

Mesure in-situ d'un coefficient de frottement dans un contact queue d'aronde par corrélation d'images numériques

A. Hingue^{1,2}, T. Chaise¹, D. Nélias¹

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

² Safran Helicopter Engines Avenue Joseph Szydlowski, 64510 BORDES, FRANCE

Résumé — Les travaux présentés ont pour objectif la mesure *in-situ* d'un coefficient de frottement (COF) dans un contact de géométrie type « queue d'aronde », représentant la liaison entre le disque et les aubes d'une turbine de moteur d'hélicoptère. Une méthode de recalage par éléments finis FEMU (Finite Element Method Updating) basée sur la comparaison des champs de déplacement numériques et expérimentaux proches du contact est mise en place. Les champs expérimentaux sont mesurés par corrélation d'images numériques (CIN).

Mots clés — Frottement, corrélation d'images numériques, FEMU.

1 Introduction

Le fretting fatigue est un processus endommageant identifié dans de nombreuses applications industrielles, en particulier l'attache pôle/disque des turbines de turbomoteur. Afin de quantifier et réduire l'impact sur la durée de vie des structures, un modèle numérique fiable est requis. La méthode des éléments finis couplée à une formulation du contact par pénalité est largement utilisée. Cependant, la valeur du coefficient de frottement numérique impacte lourdement les contraintes de contact calculées [4], et par conséquent la durée de vie estimée. Une évaluation précise de ce paramètre est alors recherchée pour éviter un modèle trop conservatif. De nombreuses méthodes d'évaluation expérimentales et analytiques de ce paramètre existent dans des situations de fretting, mais ne sont pas tout à fait satisfaisante dans la mesure où les conditions de contact diffèrent de la géométrie étudiée ici [2] [3]. Ces travaux visent à développer une méthodologie de mesure *in-situ* du COF d'une éprouvette queue d'aronde sollicitée en traction, à l'aide d'une méthode FEMU alimentée par des mesures de CIN. Les résultats ainsi obtenus serviront à améliorer la justesse de modèles éléments finis. Les mesures par CIN permettront également l'observation du comportement du contact au plus proche de l'interface.

2 Méthode

2.1 Essais

La liaison entre les aubes et le disque des turbines de turbomoteur est assurée par une géométrie de type queue d'aronde. L'éprouvette utilisée pour les essais se décompose en deux parties, nommées mâle et femelle, usinées dans un alliage base nickel. Des essais de traction uniaxiale à température ambiante ont été réalisés sur ces éprouvettes entre deux niveaux de charge F_{min} and F_{max} . Les déplacements sur les faces de l'éprouvette sont mesurés par CIN au cours du chargement. Le principe de l'essai est représenté en figure 1.

2.2 Dispositifs de CIN

Avant l'essai, les surfaces des éprouvettes ont été recouvertes d'un mouchetis noir sur blanc, appliqué à l'aide d'un pistolet aérographe équipé d'une buse de 0,15 mm. La zone d'intérêt a une taille d'environ $7 \times 8,5$ mm². Deux dispositifs de CIN sont utilisés pour mesurer les déplacements en surface des éprouvettes :

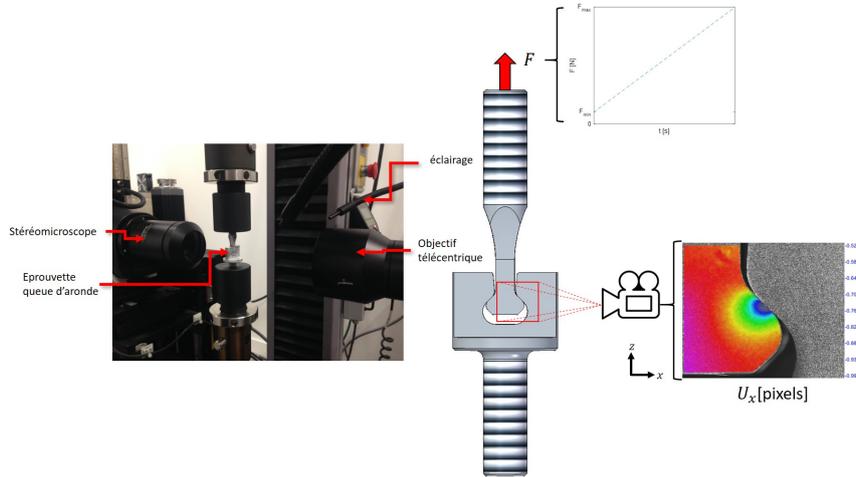


FIGURE 1 – Schéma de principe de l'essai

- Une caméra AVT Stingray F-504 d'une résolution de 5Mp avec un objectif télécentrique Myutron LSTL10H-F grossissement x1.
- Un stéréomicroscope Correlated Solutions, constitué de deux caméras Flir Grasshoper GRAS-50S5M-C d'une résolution de 5Mp. Le grossissement est imposé à x1.12.

La première caméra est utilisée pour des mesures précises des champs de déplacements 2D en surface de l'éprouvette. Le stéréomicroscope est constitué de deux caméras liées rigidement, permettant la mesure de forme et de déplacements tridimensionnels. Le calcul de corrélation d'image est réalisé avec le logiciel open source uFreckles [5]. Le comportement du contact est très sensible au positionnement relatif des deux parties de l'éprouvette. Malgré les efforts mis en place pour assurer un bon alignement, des défauts subsistent. La stéréo-CIN permet de quantifier les défauts de positionnement hors plan. Nous pouvons dès lors les intégrer dans le modèle numérique pour améliorer la convergence du modèle vers des valeurs cohérentes.

2.3 Modèle numérique

Nous avons construit en parallèle un modèle numérique éléments finis élastique en 3D de l'essai sur le logiciel Ansys. Une formulation de contact par pénalité pure est utilisée. Afin de s'approcher au plus près des conditions expérimentales, une coupe dans la géométrie globale est réalisée, afin de ne modéliser que la zone vue par la caméra. Les déplacements mesurés lors de l'essai à l'aide de la CIN sont appliqués comme conditions aux limites sur les surfaces de découpe. La taille du maillage (figure 2), dans la zone de contact respecte les considérations de [7].

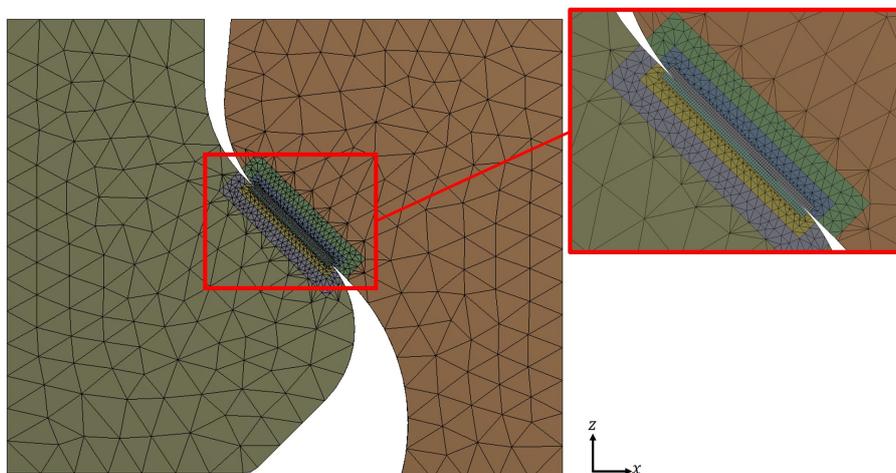


FIGURE 2 – Maillage du sous-modèle queue d'aronde

La CIN n'autorisant que la mesure des déplacements en surface, nous faisons l'hypothèse que les déplacements sur la surface de découpe ne sont pas dépendants de l'épaisseur, et sont égaux à la mesure en surface. Cette hypothèse est vérifiée grâce à un essai virtuel, consistant en un calcul éléments finis sur le modèle global des éprouvettes où le COF est fixé à une valeur de référence plausible $\mu_0 = 0,6$. Les champs de déplacements issus de ce calcul sont importés comme conditions aux limites dans deux sous-modèles. Le premier servant de référence, les trois composantes des déplacements du modèle global sont appliquées sur la surface de découpe (figure 4). Pour le second, seuls les déplacements dans le plan de mesure expérimental (plan XZ) sont appliqués comme conditions aux limites (selon l'hypothèse précédente), comme illustré sur la figure 5. Les déplacements selon l'axe Y sont imposés nuls à l'intersection entre les surfaces de découpe et le plan de symétrie XZ de l'éprouvette afin d'empêcher les mouvements de corps rigide.

Pour les deux modèles, quelle que soit la quantité d'intérêt prise en compte, la fonction erreur est convexe sur la plage d'étude. Le premier sous-modèle donne une erreur minimale en μ_0 , confirmant ainsi sa capacité à retrouver le coefficient de frottement de l'essai virtuel. En revanche, le second sous-modèle ne minimise pas la fonction erreur exactement en $\mu_0 = 0,6$, mais plutôt en $\mu = 0,62$, $\mu = 0,57$ et $\mu = 0,58$ pour les quantités d'intérêt U_x , U_z et ϵ_{xz} représentant respectivement les déplacements selon l'axe X, l'axe Z, et les déformations en cisaillement dans le plan XZ. Ces écarts restent toutefois faibles par rapport à la précision attendue sur le coefficient de frottement.

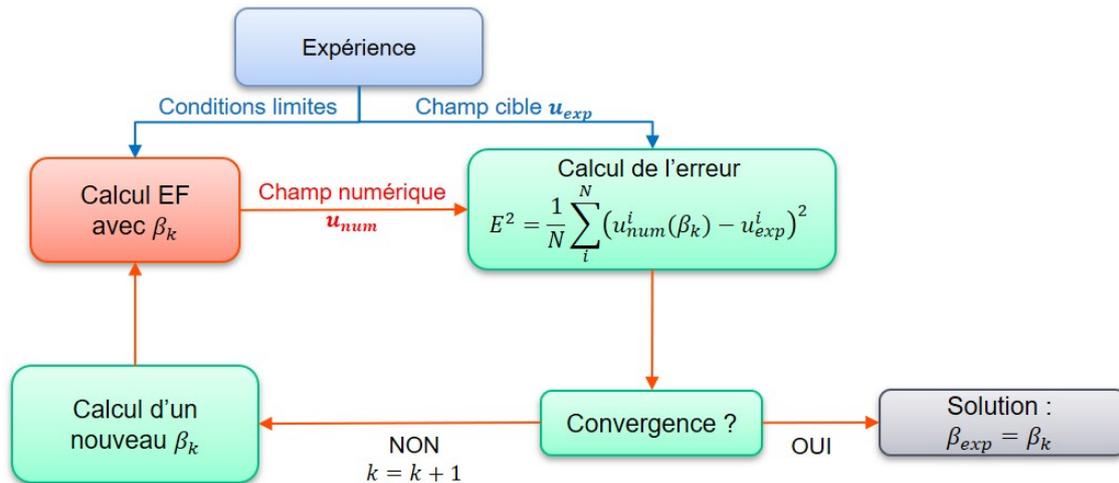


FIGURE 3 – Schéma de principe de la méthode FEMU mise en place, permettant l'obtention du jeu de paramètres expérimentaux β_{exp}

Le modèle éléments finis est introduit dans une boucle d'optimisation FEMU, contrôlée par le logiciel Matlab, dont le fonctionnement général est schématisé en figure 3. Nous nous servons de la méthode du nombre d'or pour une optimisation sur une unique variable (fonction « fminbnd »), et de la méthode de points intérieurs pour l'optimisation simultanée de plusieurs paramètres (fonction « fmincon »). Le recours à la CIN permet l'utilisation des champs de déplacements et de déformations comme quantités d'intérêt pour le calcul de la fonction erreur. Celle-ci s'exprime $E^2 = \frac{1}{N} \sum_i^N (u_{num}^i - u_{exp}^i)^2$, où N est le nombre de points de comparaison, u_{num} le champ numérique et u_{exp} le champ expérimental correspondant. Seule l'exploitation des champs de déplacements est présentée dans cette étude. Nous identifions avec cette méthode un jeu de paramètres, ayant une influence notable sur le champ de déplacement des faces observées expérimentalement, et minimisant la fonction erreur E .

3 Résultat-Discussions

L'influence de plusieurs paramètres numériques sur la capacité du modèle à retrouver les résultats expérimentaux est étudiée. Les variables identifiées comme les plus influentes sont les suivantes :

- Le coefficient de frottement ;
- L'angle relatif mâle/femelle dans le plan XZ ;
- Le statut initial du contact.

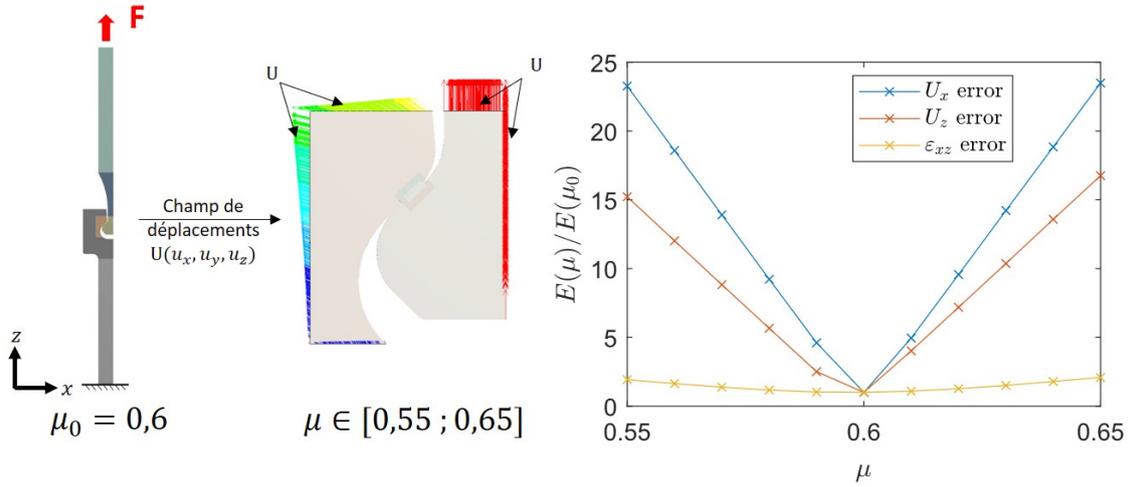


FIGURE 4 – Schéma de principe du sous-modèle et tracé de l’erreur associée en fonction du coefficient de frottement

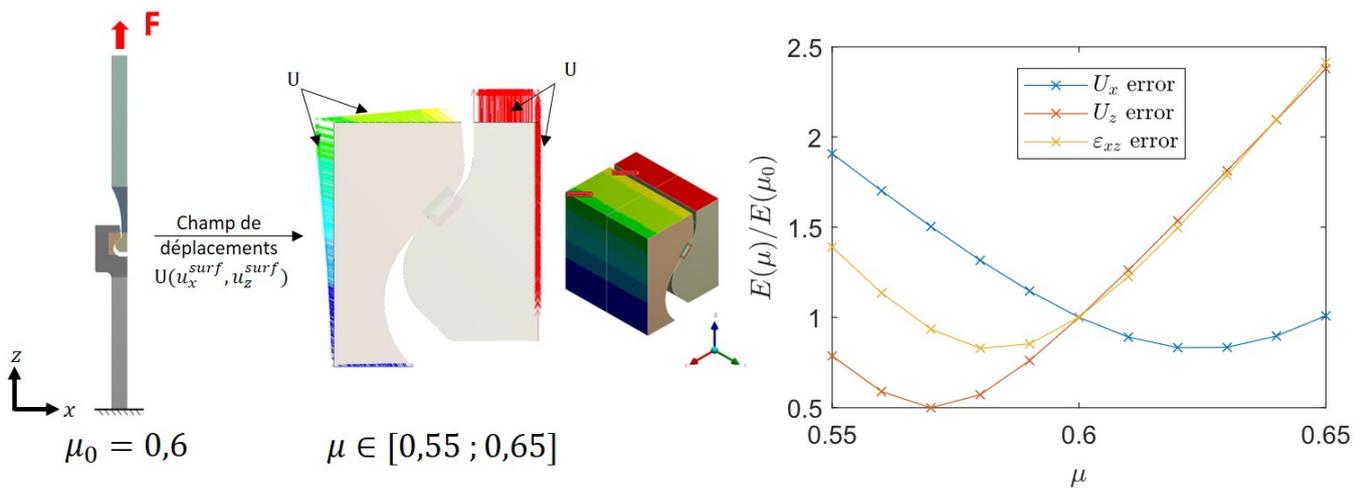


FIGURE 5 – Schéma de principe du second sous-modèle avec l’hypothèse sur les conditions aux limites. Tracé de l’erreur associée en fonction du coefficient de frottement

3.1 Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est la variable initialement ciblée par la méthode mise en place. Dans des conditions géométriques proches de l’essai, la boucle d’optimisation converge vers une valeur de COF minimisant l’erreur entre champ expérimental et champ numérique (figure 6). La valeur optimale est cependant faible comparée à la valeur attendue dans ces conditions [1] [6]. De plus, le choix de la quantité d’intérêt fait varier considérablement le résultat. Étant donné l’orientation à 45° de la surface de contact, rien ne pousse à favoriser l’une des deux composantes des déplacements plus que l’autre. Ce résultat met en lumière l’incapacité du modèle à retrouver les déplacements expérimentaux. La variable COF seule ne suffit pas pour ajuster le modèle.

3.2 Positionnement relatif

La géométrie du problème requiert une attention particulière au positionnement relatif des deux parties de l’éprouvette dans l’espace. Le paramètre géométrique ayant montré la plus forte influence est l’angle relatif dans le plan de mesure XZ. En effet, un faible écart angulaire peut faire varier considérablement le comportement du contact et donc le champ de déplacement surfacique sur la zone d’intérêt. La mesure de cet angle à l’image s’est révélée insuffisante due à la résolution des caméras. L’incertitude sur ce paramètre de premier ordre nous pousse à l’ajouter à la liste des variables à intégrer dans la boucle FEMU. La modification de l’angle relatif pouvant susciter l’apparition de surcontraintes locales,

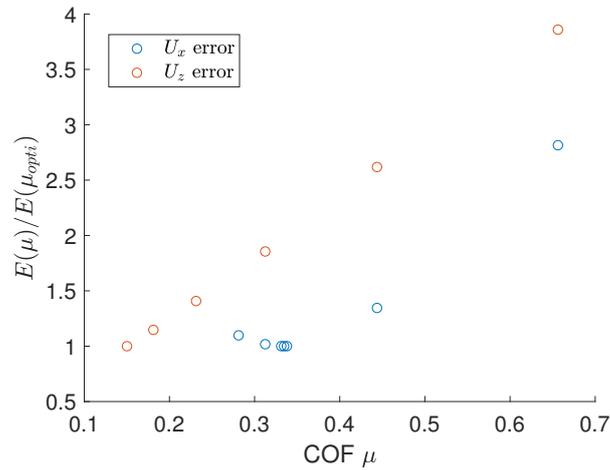


FIGURE 6 – Evolution de l’erreur en fonction du coefficient de frottement numérique

un modèle intégrant les effets plastiques est réalisé et comparé au modèle élastique. Les deux modèles convergent vers une même valeur, représentée en figure 7. Ce résultat confirme la sensibilité des éprouvettes aux défauts de positionnement angulaire.

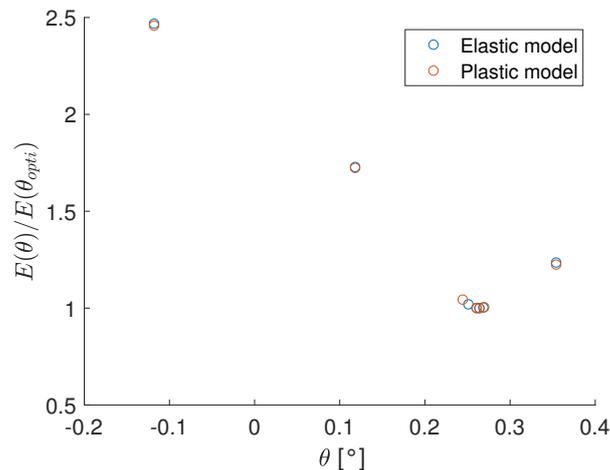


FIGURE 7 – Evolution de l’erreur calculée avec les déplacements U_x , en fonction de l’angle relatif θ

3.3 Statut initial du contact

Le modèle numérique étant contraint en déplacement, les conditions initiales du contact jouent un rôle prépondérant sur la charge subie par la surface de contact. Une augmentation de l’interpénétration initiale se traduit par une hausse de la résultante de contact. Lorsque la boucle de recalage FEMU est lancée avec pour seule variable l’interpénétration initiale maximale, le modèle converge vers une certaine valeur d’interpénétration initiale (figure 8). Cette observation témoigne de la dépendance du sous-modèle au positionnement initial des deux parties de l’éprouvette.

Ce paramètre diffère des autres dans la mesure où il représente un biais numérique et non un phénomène physique. Son influence disparaît totalement lorsque le modèle est contraint en effort puisque les pièces peuvent se déplacer librement selon l’axe de traction.

4 Conclusion

L’objectif de la méthodologie présentée est d’apporter une estimation du COF dans un contact proche des conditions réelles de fonctionnement. Le couplage de la CIN avec une méthode FEMU a permis

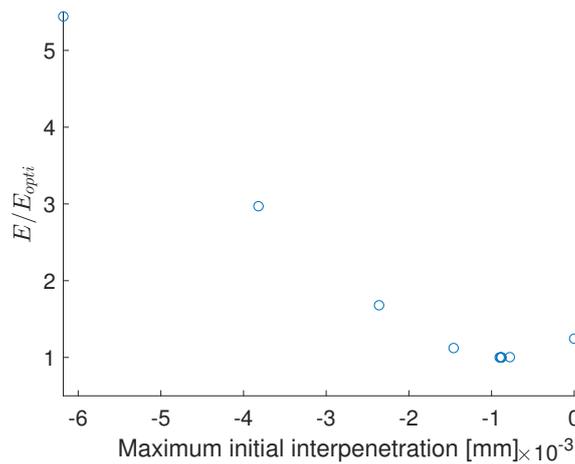


FIGURE 8 – Evolution de l’erreur calculée avec les déplacements U_x , en fonction de l’interpénétration initiale maximale

d’identifier des paramètres influents autres que le COF, et de mettre en évidence les variabilités d’essais, notamment géométriques. Nous disposons alors de leviers pour ajuster le modèle numérique et déterminer les conditions d’essais.

Les valeurs du COF expérimental, et des autres paramètres identifiés par la méthode pourront être introduites dans le modèle numérique, avec pour objectif final de fournir des durées de vies en accord avec l’expérience. Le frottement est un paramètre évoluant au cours des cycles de chargement. L’adaptation de la présente méthode à un chargement de fatigue pourrait apporter des informations intéressantes à propos de l’évolution du COF au cours du temps.

Références

- [1] Ahmadi, Arman, Farshid Sadeghi, et Steve Shaffer. *In-Situ Friction and Fretting Wear Measurements of Inconel 617 at Elevated Temperatures*, Wear 410-411 (15 septembre 2018)
- [2] Hojjati-Talemi, Reza, Magd Abdel Wahab, Jan De Pauw, et Patrick De Baets. *Prediction of Fretting Fatigue Crack Initiation and Propagation Lifetime for Cylindrical Contact Configuration*, Tribology International, Proceedings of the Seventh International Symposium on Fretting Fatigue, 76 (1 août 2014)
- [3] Llavori, I., A. Zabala, A. Aginagalde, W. Tato, J. J. Ayerdi, et X. Gómez. *Critical Analysis of Coefficient of Friction Derivation Methods for Fretting under Gross Slip Regime*, Tribology International 143 (1 mars 2020)
- [4] Meguid, S. A., P. S. Kanth, et A. Czekanski. *Finite Element Analysis of Fir-Tree Region in Turbine Discs*. Finite Elements in Analysis and Design 35, n° 4 (1 juillet 2000)
- [5] J. Réthoré, *UFreckles (version v 2.0)*, Zenodo, 2018.
- [6] Sassy, Odin. *Etude expérimentale du comportement sous chargement de fretting simple à haute température de superalliages à base nickel MC2 et CMSX-4. Application aux aubes de turbine pour moteur d’hélicoptère*, These de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2017
- [7] Sinclair, G. B., N. G. Cormier, J. H. Griffin, et G. Meda. *Contact Stresses in Dovetail Attachments : Finite Element Modeling*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 124, n 1 (1 janvier 2002)