

# Prédiction de propagation de fissure et de la durée de vie en fatigue des pales de ventilateur A356-T6 par une approche de cosimulation

M. Ben Hassen<sup>1</sup>, S. Ben Elechi<sup>2</sup>, H. Mrad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> École de génie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Canada, [mariam.benhassen@uqat.ca](mailto:mariam.benhassen@uqat.ca), [hatem.mrad@uqat.ca](mailto:hatem.mrad@uqat.ca)

<sup>2</sup> Laboratoire LGM, ENIM, rue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie. [slim.benelechi@issig.u-gabes.tn](mailto:slim.benelechi@issig.u-gabes.tn)

---

**Résumé** — Dans cette étude, une approche numérique de cosimulation a été établie afin de contribuer à la gestion de la durée de vie des pales de ventilateur axial minier. Tout d'abord, une analyse microscopique de la zone de rupture a été investiguée pour justifier la fissuration par fatigue de pale. En outre, une approche pratique a été proposée et mise en œuvre sur la base de cosimulation ABAQUS-FRANC3D pour prédire facilement et efficacement le comportement de propagation des fissures dans les pales de ventilateur. Les facteurs d'intensité de contrainte calculés et l'effet des différents rapports de contraintes sur la durée de vie en fatigue ont été examinés.

**Mots clés** — Cosimulation, Pales de ventilateur axial minier, Durée de vie en fatigue.

---

## 1. Introduction générale

Les composants de ventilateur minier subissent des sollicitations extrêmes. Ils sont également exposés à des vitesses élevées et des atmosphères hostiles et oxydantes. Par conséquent, ces applications exigent des matériaux présentant une résistance et une rigidité élevées, ainsi qu'une bonne résistance à la rupture. Divers types de superalliages métalliques ont été mis au point pour ces applications. Les alliages d'aluminium possèdent de bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'une résistance à l'oxydation et à la corrosion et ils sont largement utilisés dans la fabrication des pales des ventilateurs axiaux. En raison de la géométrie et de la forme irrégulière des pales de ventilateur, les charges de fatigue durant le service entraînent une concentration des contraintes. Ceci peut aboutir à l'apparition et à la croissance de fissures de fatigue soumises à des charges de service, ce qui entraîne une fracture. Afin d'éviter toute fracture prématurée susceptible de provoquer des accidents catastrophiques, il est nécessaire d'étudier le comportement de la croissance des fissures et de prédire la durée de vie en fatigue des pales de ventilateurs.

Comparativement à la méthode expérimentale, qui demande beaucoup de temps et de ressources, la simulation numérique est une méthode efficace et économique pour évaluer la propagation des fissures de fatigue [1], particulièrement la méthode des éléments finis. Nombreux travaux ont été menés sur l'étude numérique du comportement de la propagation des fissures de fatigue sur les pales des machines tournantes que ce soit à l'aide de codes internes ou en utilisant des codes de logiciels courants. Ray et Patankar [2,3] ont utilisé des codes maison pour étudier le comportement de propagation de fissure dans les alliages ductiles sous des charges d'amplitude variable. Remadi et al. [4] ont utilisé ABAQUS pour évaluer le comportement de fissuration par fatigue. L'analyse du comportement de fissure par fatigue dans les matériaux et composants structurels est désormais à la portée de tous grâce à des outils logiciels standard tels que FRANC3D et MSc Fatigue. Une propagation plus rapide est maintenant possible grâce à la fonction de génération automatique de maillage développée dans FRANC3D [5]. Les études

disponibles sur la propagation des fissures sous des charges standard de ventilateur axial minier sont limitées.

Dans la présente étude, le comportement de la propagation de fissure par fatigue de la pale de ventilateur axial sous un chargement cyclique a été déterminé par la méthode de cosimulation ABAQUS- FRANC3D. Dans la section 2, l'analyse de surface de rupture par microscopie électronique à balayage (MEB) est présentée afin d'identifier la zone d'initiation de fissure et de justifier la fissuration par fatigue de pale. Dans la section 3, les théories et méthodes fondamentales utilisées dans ce travail sont présentées, ainsi que le déroulement de l'algorithme de la méthode proposée est expliqué en détail. Dans la section 4, cette méthode numérique est appliquée à un cas d'art pratique, où les facteurs d'intensité de contrainte en mode mixte sont calculés avec précision et la durée de vie en fatigue sous surcharge cyclique est analysée. Finalement, les conclusions et perspectives sont présentées dans la section 5.

## **2. Analyse microscopique de la surface de rupture**

Le ventilateur axial étudié dans ce travail est un modèle de ventilateur axial de 42 pouces [6,7], installé dans une mine d'or dans la région d'Abitibi-Témiscamingue au Québec. Lors du fonctionnement, un incident s'est produit et une alerte a conduit à l'arrêt du ventilateur. Une enquête a révélé que les pales ont été détruites l'une après l'autre. L'inspection de la zone de fracture de ces dernières conclut que les fissures étaient amorcées au même endroit, et ce, pour toutes les pales.

La figure 1 présente les résultats obtenus par microscopie électronique à balayage (MEB) de la surface fracturée de la pale en A356-T6 à la suite d'une rupture par fatigue. La rupture par fatigue est identifiable par l'aspect métallographique de la surface de rupture commençant par l'apparition des fissures et allant jusqu'à leur propagation. La zone d'initiation de la fissure se distingue par une surface lisse qui reflète la zone de flexion par glissement. Les trajectoires des fissures se distinguent par les lignes blanches plus claires Figure 1.a. Les bandes de glissement marquées par les flèches rouges dans la Figure 1.b indiquent les zones d'initiation des fissures avec une déformation importante causée par le mouvement de cisaillement entre les plans cristallins. La présence de bandes de glissement induit une rugosité intense de la surface ainsi qu'une déformation plastique la Figure 1.d. La formation de cavités avec un mouvement circulaire dans la direction de la vitesse de rotation du ventilateur révèle une rupture ductile due à la fatigue (Figure 1.c). Cette image révèle également l'existence d'oxydes dans la matrice d'aluminium (indiqués par des flèches bleues). Ces oxydes nuisent au comportement en fatigue et aux propriétés de la microstructure des alliages examinés. Ce genre d'imperfections témoigne des enjeux et des défis associés à la technique du moulage, qui implique l'utilisation d'outils de haute précision et de haute technicité [8].

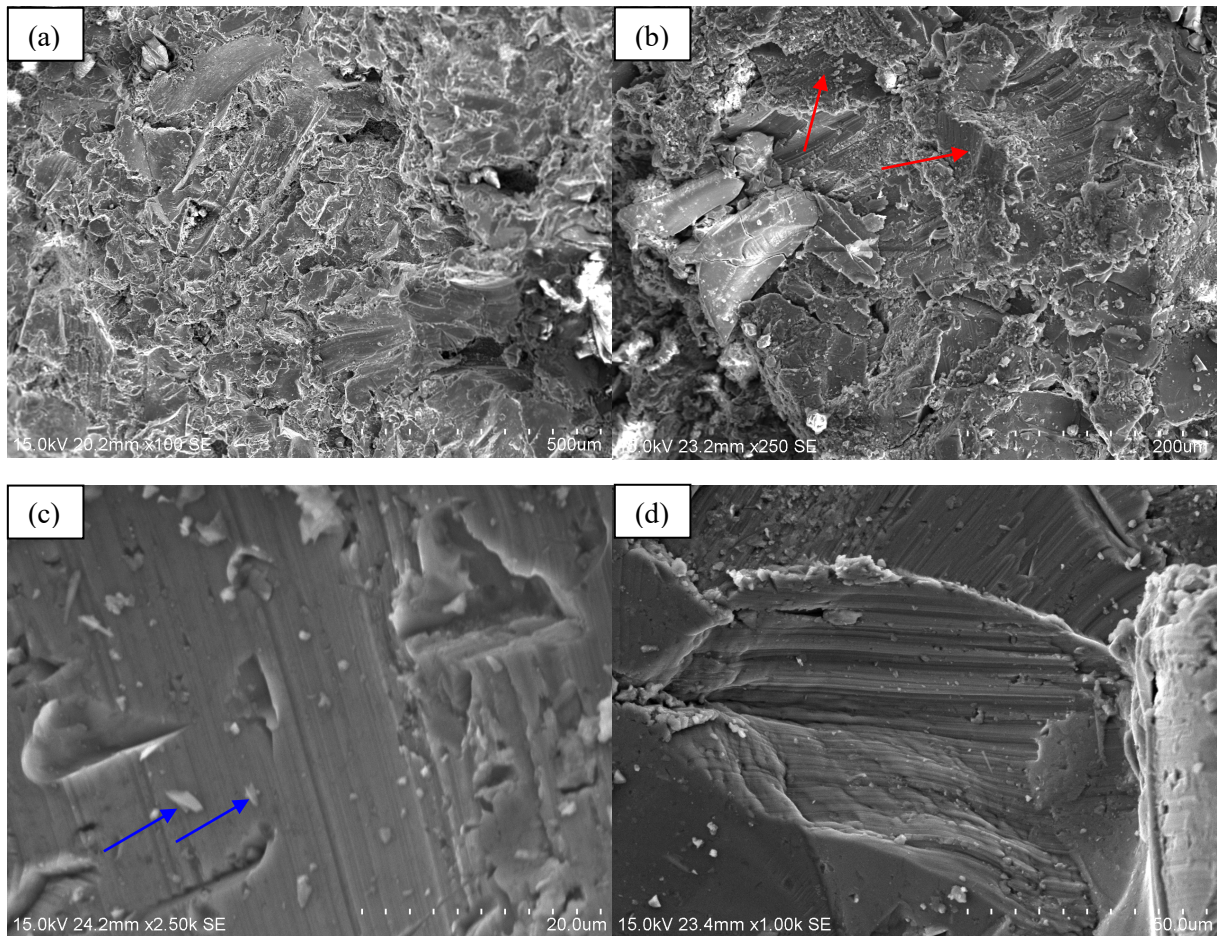


Figure 1 – Analyse de la surface de rupture en fatigue de pale A356-T6 par microscopie MEB

### 3. Méthode de calcul et d'analyse de la propagation des fissures

#### 3.1. Analyse des contraintes sans fissure

Avant de prédire la propagation des fissures en fatigue, une analyse approfondie des contraintes de la pale dans des conditions opératoires a été réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS [9]. Un modèle tridimensionnel (3D) de la pale de ventilateur a été élaboré en utilisant un maillage de type quadratique tétraédrique à 10 nœuds (C3D10) de 45 033 éléments. Le maillage a été raffiné dans la zone de jonction pale/racine et sa convergence a été étudiée. Les propriétés mécaniques principales du matériau de la pale en Aluminium A356 -T6 sont présentées dans le tableau 1. Des conditions limites ont été appliquées ; la racine de la pale a été fixée dans toutes les directions et une force centrifuge du corps à une vitesse maximale de 1800 tr/min a été imposée au modèle.

Table 1 – Propriétés mécaniques du A356 -T6

Propriétés mécaniques	Valeurs
Module d'Young E	70 [GPa]
Coefficient de Poisson $\nu$	0.3
Densité $\rho$	2.68 [ $g/cm^3$ ]
Résistance à la traction $\sigma_b$	275.8 [MPa]
Limite d'élasticité $\sigma_{0.2}$	213.75 [MPa]

La distribution de la contrainte de von Mises du côté pression de la pale (figure 2) montre que la contrainte maximale est localisée à la zone entre la racine et le corps de la pale. Ceci est dû à la distribution non uniforme des contraintes à cet endroit. La zone de concentration de la contrainte locale à l'intersection de la pale et des racines révèle une forte concordance entre l'emplacement prédit et l'emplacement réel de la rupture.

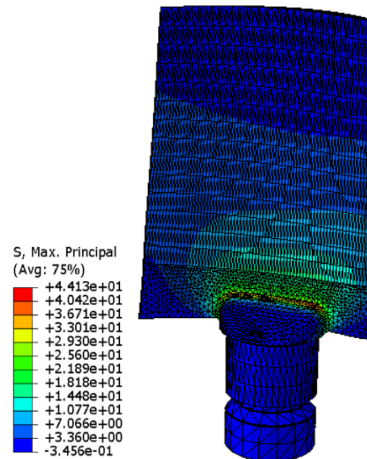


Figure 2– Distribution des contraintes de von Mises de la pale

### 3.2. Analyse de la propagation des fissures

Pour décrire la propagation des fissures par fatigue, de nombreuses lois ont été établies. La formule la plus populaire adoptée par les ingénieurs dans les cinquante dernières années, et bien connue pour prédire la propagation des fissures de fatigue, repose sur la loi de puissance décrite par Paris et Erdogan [10] donnée par l'expression suivante:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

Où  $a$  la longueur de la fissure,  $\frac{da}{dN}$  la vitesse de propagation de la fissure,  $\Delta K$  la plage des facteurs d'intensité de contrainte appliqués (FIC) et  $C$  et  $m$  deux coefficients du matériau.

Dans cette étude, le modèle Forman de Koning (FNK) (NASGRO) a été utilisé, puisqu'il possède de nombreux avantages par rapport aux autres modèles existants. L'équation FNK tient compte de la valeur seuil de fatigue, des effets de résistance à la rupture par fatigue et des effets de fermeture des fissures avec une meilleure correspondance pour différents rapports de chargement [11]. Elle s'exprime comme suit :

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{(1-f)}{(1-R)} \Delta K \right)^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_C}\right)^q} \quad (2)$$

avec  $N$  le nombre de cycles de charge appliquée,  $\Delta K$  la plage SIF,  $K_{max}$  le facteur d'intensité de contrainte correspondant à la charge maximale appliquée,  $R$  le rapport de contrainte, et  $p$ ,  $q$ ,  $C$  et  $n$  les coefficients empiriques.

### 3.3. Processus de cosimulation ABAQUS-FRANC3D

Pour faciliter le processus d'analyse et pour minimiser les ressources nécessaires et le temps d'analyse, l'approche de simulation du logiciel de propagation des fissures FRANC3D en conjonction avec le logiciel ABAQUS est adoptée dans le présent document afin de simuler la propagation des fissures. La figure 3 présente le processus de cosimulation ABAQUS-FRANC3D.

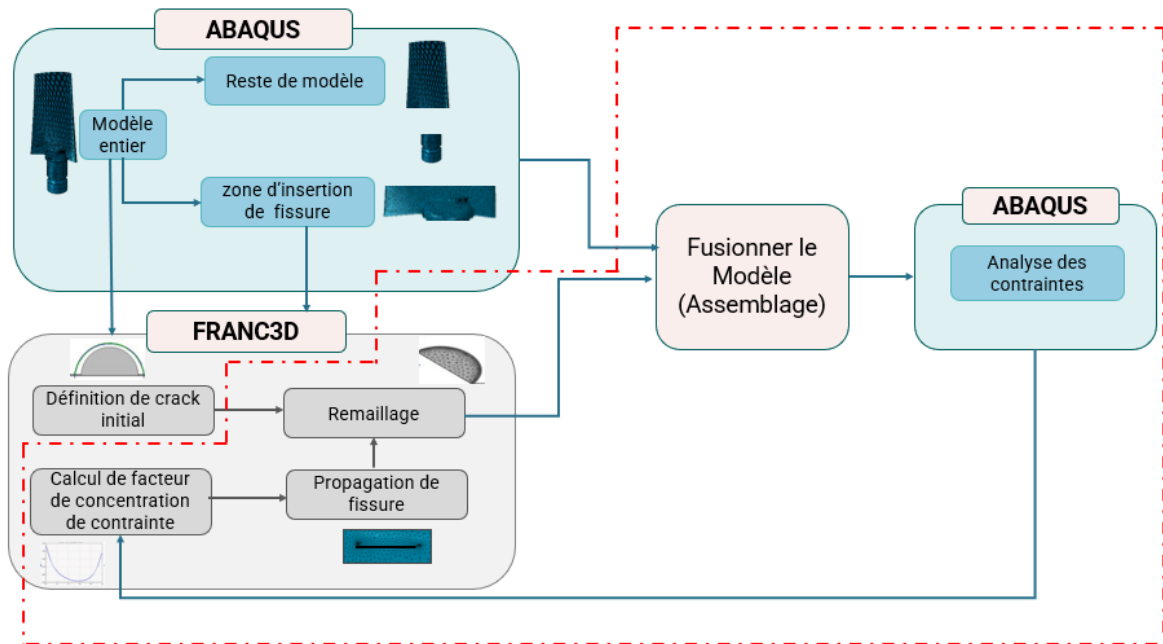


Figure 3–Processus de cosimulation ABAQUS-FRANC3D pour la propagation de fissure et la prédiction de la durée de vie en fatigue

La première étape du processus consiste à établir le modèle d'éléments finis (E.F) de la pale à l'aide du logiciel ABAQUS. Le résultat a été importé dans FRANC3D, le modèle original a été décomposé en régions globales et locales de manière à optimiser la précision des calculs et à éviter le remaillage de l'ensemble du modèle à chaque étape de la propagation de la fissure.

Après l'importation du modèle E.F, une fissure initiale a été insérée dans le sous modèle, à l'emplacement où la contrainte est maximale dans la région de jonction entre la pale et la racine de la pale. La forme et la taille de la fissure initiale ont été supposées être une fissure superficielle semi-elliptique avec  $a = c = 1$  mm. Cette hypothèse s'appuie sur plusieurs études d'analyse des défaillances des pales, notamment dans les travaux de Hassen et al [6], Liu et al [12], Branco et al [13] et Witek [14]. Une fois la fissure insérée, la géométrie de la fissure a été définie et une séquence d'opérations géométriques a été lancée pour établir un maillage sensible de haute qualité autour de la pointe de la fissure pour garantir l'efficacité et la précision du calcul. La connexion entre le modèle global et le modèle local est effectuée par la suite en fusionnant les nœuds dans le logiciel ABAQUS. Il s'agit ensuite de refaire l'analyse de contraintes et de les importer dans FRANC3D pour le calcul des FIC, et pour la prédiction du chemin de propagation de la fissure pour chaque incrément. Ces étapes (entourées par le contour rouge dans la figure 3) ont été répétées jusqu'à atteindre le nombre d'incrément définis ou la fracture totale de la pale.

## 4. Résultats

Les résultats des FIC le long de plusieurs fronts de fissure ont été calculés à chaque point discret par la méthode M-intégrale [15]. Les résultats des calculs sont présentés à la figure 4. Ce graphique illustre les FIC du mode I et mode II pour les 100 premières itérations de fissure, obtenues par le code FRANC3D.

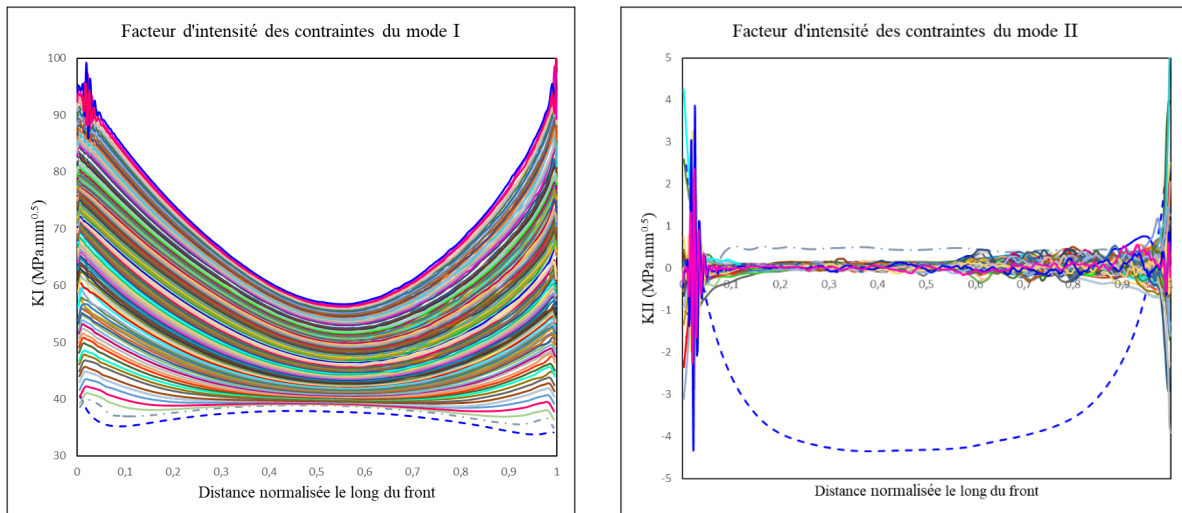


Figure 4 –Facteurs d’intensité des contraintes pour mode I et mode II le long des 100 premiers fronts de fissure

On remarque que les valeurs des FIC du mode I le long du front de fissure augmentent au fur et à mesure avec la propagation de la fissure, tout en conservant la même forme. La complexité du développement de la fissure se reflète par la variation du mode I, où les valeurs KI les plus faibles sont situées au milieu de la fissure et augmentent de part et d'autre. Pour le premier mode, les FIC maximales se situent près des extrémités de la fissure et les FIC minimales se situent à la profondeur maximale de la fissure. Dans le mode II, il y avait un fléchissement dans la première étape, de sorte que le FIC le long du front de la fissure pour la fissure initiale était non nul, alors que le reste des itérations de la fissure se sont étendues pour répondre à la théorie de la contrainte de traction maximale (CTM).

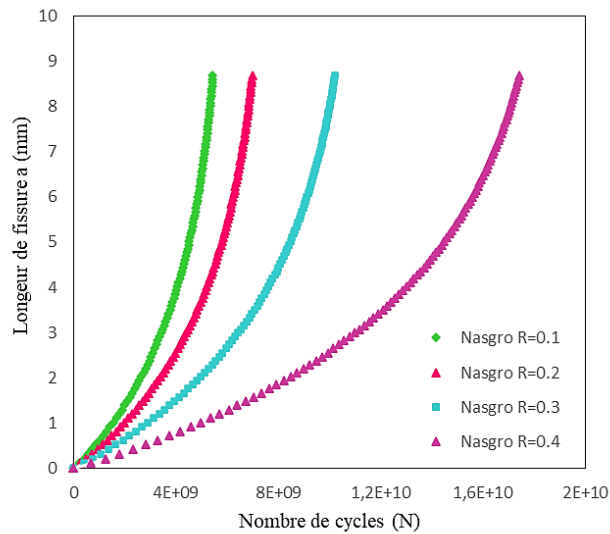


Figure 5 –Durée de vie en fatigue de la pale pour différents rapports de contrainte

La durée de vie de la pale par fatigue a été calculée pour quatre différents rapports de contrainte  $R = 0,1, 0,2, 0,3$  et  $0,4$ . Comme illustré dans la Figure 5, la durée de vie est proportionnelle au rapport de contrainte. Lorsque le rapport de contrainte  $R=0,1$ , la fissure initiale de  $0,1\text{mm}$  de longueur s'étend à  $8,67\text{ mm}$  avec un cycle de vie prédit de  $5,44\text{E}+09$  cycles depuis l'initiation, tandis que pour le cas où le rapport de contrainte  $R=0,4$ , la fissure initiale de  $0,1\text{mm}$  s'étend à la même longueur de  $8,67\text{ mm}$  avec un cycle de vie prédit de  $1,74\text{E}+10$  cycles.

## 5. Conclusion

En ce qui concerne l'analyse par éléments finis et l'étude réalisée pour prédire les cycles de fatigue et la propagation de fissure de la pale de ventilateur minier axial, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La propagation des fissures dans ce document est principalement basée sur une série d'analyses statiques des fissures obtenue par cosimulation ABAQUS-FRANC3D, cette méthode se distingue des méthodes classiques intégrées d'ABAQUS. Ce qui permet de prédire la trajectoire de propagation des fissures de la pale.
- Le modèle de propagation de fissure NASGRO a été utilisé pour prédire la durée de vie des fissures de fatigue de la pale du ventilateur axial sous différents rapports de contrainte. Les résultats ont montré que le cycle de vie dépendait de manière significative du rapport de contrainte.

Dans le cadre de travaux futurs, cette méthode peut être étendue en considérant une méthode qui prend en compte l'inclusion des effets d'interaction des charges dans les modèles de prédiction. En outre, comme extension de cette étude, une optimisation du modèle de la pale sera proposée et comparée avec le modèle actuel afin d'augmenter la durée de vie de ventilateur axial.

## Remerciements

Nous apprécions le soutien du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Ce travail est également soutenu par le partenaire industriel Hyperflo de Rouyn-Noranda.

## Références

- [1] Z. Chen, H. Bao, Y. Dai, Y. Liu, Numerical prediction based on XFEM for mixed-mode crack growth path and fatigue life under cyclic overload, *International Journal of Fatigue*. 162 (2022) 106943. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106943>.
- [2] A. Ray, R. Patankar, Fatigue crack growth under variable-amplitude loading: Part I – Model formulation in state-space setting, *Applied Mathematical Modelling*. 25 (2001) 979–994. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00026-9).
- [3] A. Ray, R. Patankar, Fatigue crack growth under variable-amplitude loading: Part II – Code development and model validation, *Applied Mathematical Modelling*. 25 (2001) 995–1013. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00027-0).
- [4] A. Remadi, A. Bahloul, C. Bouraoui, Prediction of fatigue crack growth life under variable-amplitude loading using finite element analysis, *Comptes Rendus Mécanique*. 347 (2019) 576–587. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2019.06.008>.
- [5] Franc3d v7.1 Brochure | PDF | Fracture | 3 D Computer Graphics, Scribd. (n.d.). <https://www.scribd.com/document/369602385/Franc3d-v7-1-Brochure> (accessed September 16, 2023).
- [6] M.B. Hassen, S.M. Fakhari, H. Mrad, Assessment of Crack Growth and Fatigue Life of an Axial Fan Blade Based on a Co-Simulation Approach, *Advances in Materials Science*. 23 (2023) 61–79. <https://doi.org/10.2478/adms-2023-0017>.
- [7] J. Msahli, H. Mrad, F. Masmoudi, N. Khabou, E. Esharkawi, On the Improvement of the Performance of an Axial Mining Fan: Parametric Study, in: L. Walha, A. Jarraya, F. Djemal, M. Chouchane, N. Aifaoui, F. Chaari, M. Abdennadher, A. Benamara, M. Haddar (Eds.), *Design and Modeling of Mechanical Systems - V*, Springer International Publishing, Cham, 2023: pp. 342–352. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14615-2\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14615-2_39).
- [8] M. Attia, K.A. Ragab, M. Bouazara, X.-G. Chen, Fatigue Cycles and Performance Evaluation of Accelerating Aging Heat Treated Aluminum Semi Solid Materials Designed for Automotive Dynamic Components, *Applied Sciences*. 10 (2020) 3008. <https://doi.org/10.3390/app10093008>.
- [9] Design and Engineering Simulation | SIMULIA – Dassault Systèmes, (n.d.). <https://www.3ds.com/products-services/simulia/> (accessed September 20, 2023).
- [10] P. Paris, C; ERDOGAN, F: A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*. 85 (1963) 528–34.
- [11] S.R. Mettu, V. Shivakumar, R.G. Forman, J.J. McMahon, N. Johnson, J.C. Newman, N. Langley, NASGRO 3.0 - A SOFTWARE FOR ANALYZING AGING AIRCRAFT, (n.d.) 10.
- [12] H. Liu, X. Yang, S. Li, D. Shi, A numerical approach to simulate 3D crack propagation in turbine blades, *International Journal of Mechanical Sciences*. 171 (2020) 105408. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105408>.
- [13] R. Branco, F.V. Antunes, J.D. Costa, F.P. Yang, Z.B. Kuang, Determination of the Paris law constants in round bars from beach marks on fracture surfaces, *Engineering Fracture Mechanics*. 96 (2012) 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.07.009>.
- [14] L. Witek, M. Wierzbńska, A. Poznańska, Fracture analysis of compressor blade of a helicopter engine, *Engineering Failure Analysis*. 5 (2009) 1616–1622. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.10.022>.
- [15] J. Hou, J. Lv, A. Ricoeur, Y. Hu, H. Zuo, Y. Chen, Q. Li, The M-integral in fracture and damage mechanics: A review of developments and applications, *Engineering Fracture Mechanics*. 273 (2022) 108741. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108741>.