

# Propagation de la fissure des matériaux pour application à l'aéronautique (cas des avions utilisées sous les conditions climatiques tropicaux).

**Julio Stéphane RANDRIATAHINA<sup>a</sup>, Jhonson Harilaza RAMIHAJAMANANA<sup>b</sup>, Faliniaina RASOANOAVY<sup>c</sup>, Regif MOUGIN<sup>d</sup>.**

- a. Laboratoire de Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Madagascar, [stephanjulio@gmail.com](mailto:stephanjulio@gmail.com)
- b. Laboratoire de Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Madagascar, [jhonsonharilaza@gmail.com](mailto:jhonsonharilaza@gmail.com)
- c. Laboratoire de Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Madagascar, [espa.tana@gmail.com](mailto:espa.tana@gmail.com)
- d. Laboratoire de Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Madagascar, [regifmouginassist@gmail.com](mailto:regifmouginassist@gmail.com)

## Résumé :

*La théorie de la mécanique de l'endommagement représente un outil essentiel pour l'analyse de la structure métallique et pour l'étude de la sécurité. L'objectif de ce travail était de réaliser un programme spécifique prenant en compte la mécanique non linéaire couplée à la méthode Level-Set et XFEM pour comprendre la propagation des fissures en couche mince dans les applications aéronautiques (cas des avions utilisées sous les conditions climatiques tropicaux). Lors de la première étape, le développement d'une équation différentielle partielle, basée sur la méthode existante dans la littérature, a été réalisé. Une brève revue de ces deux méthodes a également été introduite pour la compréhension du comportement de la propagation de la fissure macroscopique par rapport aux contraintes externes pour une couche métallique. Les courbes de fatigue pour différents échantillons sélectionnés peuvent être facilement extraites à l'aide du programme créé. Ensuite, une phase expérimentale (essai de traction) a été réalisée et une procédure de comparaison des résultats constitutifs est effectuée pour le processus de validation. Finalement, la méthode de Réseau de Neurone Artificiel a été utilisée pour l'identification des courbes contrainte-déformation afin de proposer les paramètres élastiques optimaux.*

## Abstract :

*The theory of damage mechanics is an essential tool for the analysis of the metallic structure and for the study of safety. The objective of this work was to carry out a specific program considering the nonlinear mechanics coupled to the Level Set and XFEM method to understand the propagation of thin-layer cracks in aeronautical applications (case of aircraft used under tropical climatic conditions). In the first step, the development of a partial differential equation, based on the existing method in the literature, was realized. A brief review of these two methods has also been introduced*

*for the understanding of the behavior of macroscopic crack propagation with respect to external stresses for a metal layer. The fatigue curves for different selected samples can be easily extracted using the created program. Then, an experimental phase (tensile test) was carried out and a procedure for comparing the constituent results is carried out for the validation process. Finally, the Artificial Neural Network method was used to identify stress-strain curves in order to propose optimal elastic parameters.*

**Mots clefs : Plasticité, Méthode Level-Set, XFEM, Propagation de la fissure, Réseau de Neurone Artificiel, Aéronautique.**

## 1 Introduction

Les structures des avions sont soumises à des chargements répétés liés aux séquences décollages–atterrissages [1] et aux trous d'air de la voilure, liées à la pressurisation de la cabine à chaque vol pour le fuselage. Ces sollicitations sont à l'origine du phénomène de rupture par fatigue qui a causé beaucoup d'accidents dans le passé. C'est ainsi, dans ce travail, nous avons étudié théoriquement la propagation de la fissure de quelques échantillons d'avions utilisés dans l'hémisphère sud. Pour ce faire, il nous a fallu associer la théorie de la mécanique des milieux continus linéaire avec la méthode numérique de level set function [2] (fonctions de niveau). Une fois la sélection des équations achevée, le logiciel Abaqus® [3] xfem [2] a été choisi pour l'implémentation des différents modèles en éléments finis correspondant aux équations retenues. Des simulations de plaques métalliques ont été alors entretenues. Par ailleurs, des essais mécaniques, de quelques échantillons, issus de quelques avions en fin de vie, ont été aussi conduits afin de conforter nos résultats. Au final, il a été observé que les résultats théoriques et les mesures concordent et ne présentent qu'une légère différence, validant partiellement la méthode retenue et le programme de développé.

## 2 Méthodologie

La disposition d'une machine de traction de matériaux (TESTWELL) [4] (figure 1) nous a permis d'entretenir des essais mécaniques des matériaux sous forme des plaques métalliques.



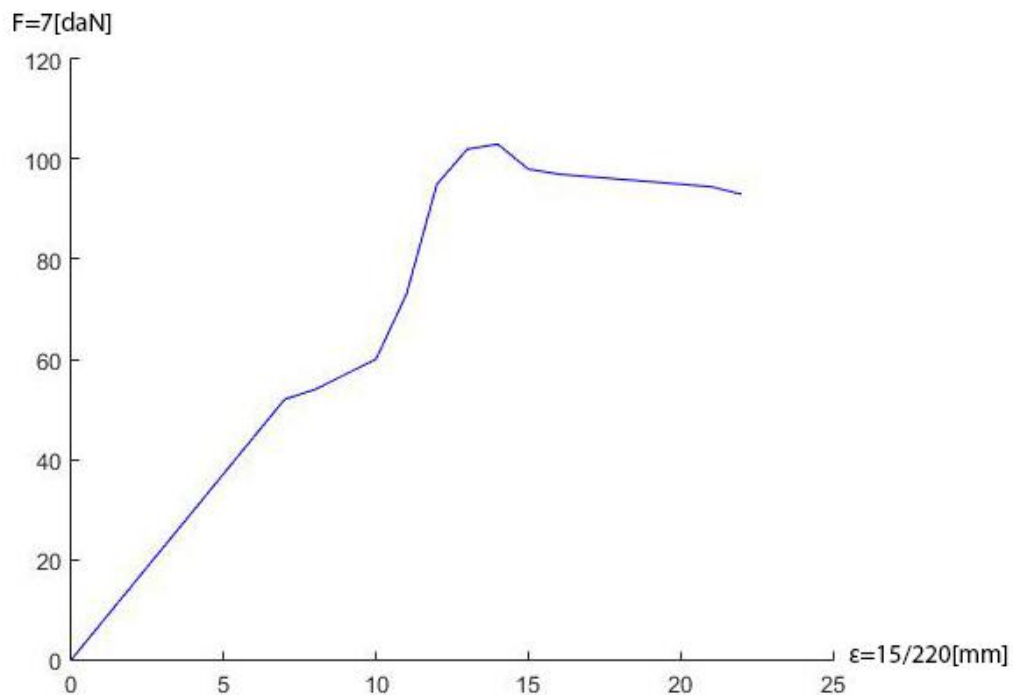
**Figure 1** : Machine de traction (TestWell)

Les propriétés élastiques de chaque échantillon sont alors extraites à l'issue de cette première partie du travail. Ces dernières servent de données d'entrée pour la simulation, sous Abaqus®, de la propagation de la fissure de chaque métal. Afin de bien exploiter les résultats mécaniques, l'identification de ces courbes avec la méthode des réseaux de neurone nous a fourni des données beaucoup plus précises.

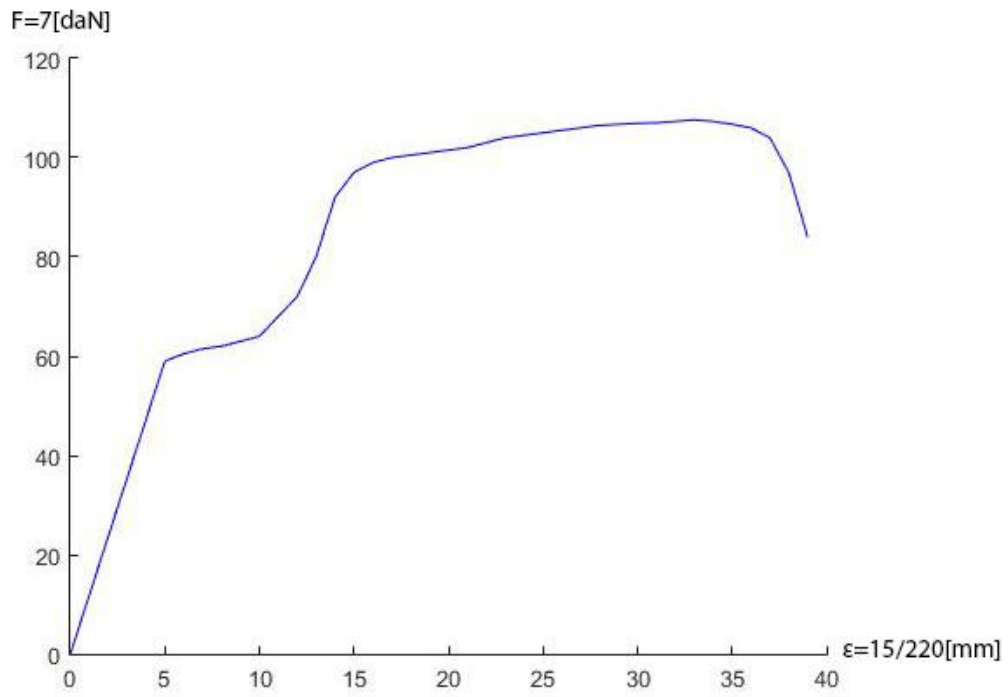
La résolution numérique des problèmes liés à la mécanique de rupture est essentielle afin de quantifier et prédire le comportement des structures fissurées mises en charge. La méthode des éléments finis étendue nous offre la plus grande possibilité de la simulation de la fissure d'une structure sous sollicitation mécanique. La technique proposée par Abaqus®, dans ce contexte est d'évaluer par les fonctions de niveaux, l'état de la fissure de la structure à l'étude.

### 3 Résultats

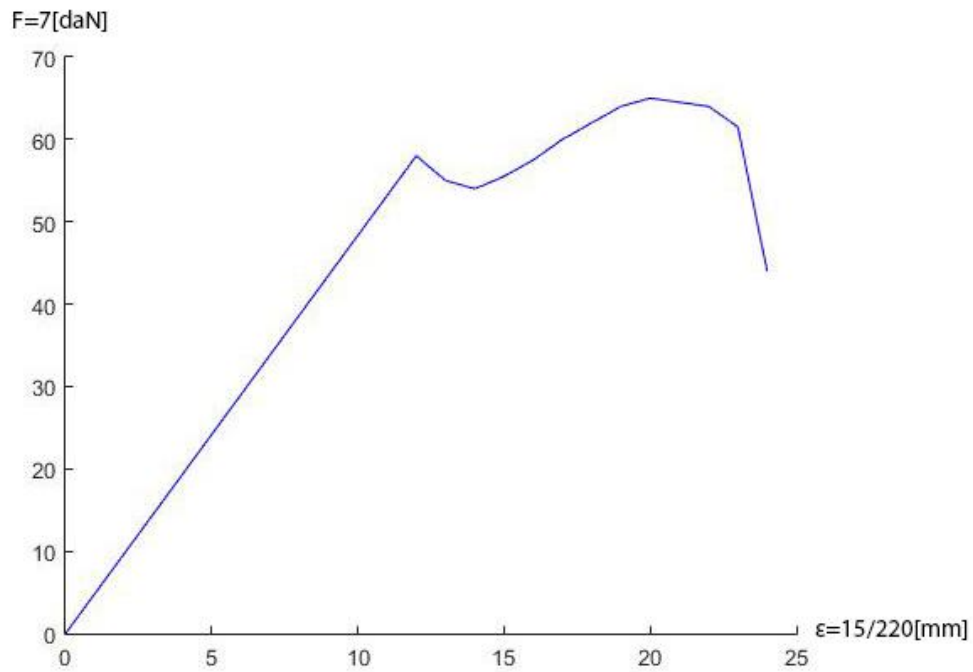
Les courbes représentées dans les figures (figure 2) suivantes, sont les résultats issus de la campagne de caractérisation de chaque échantillon.



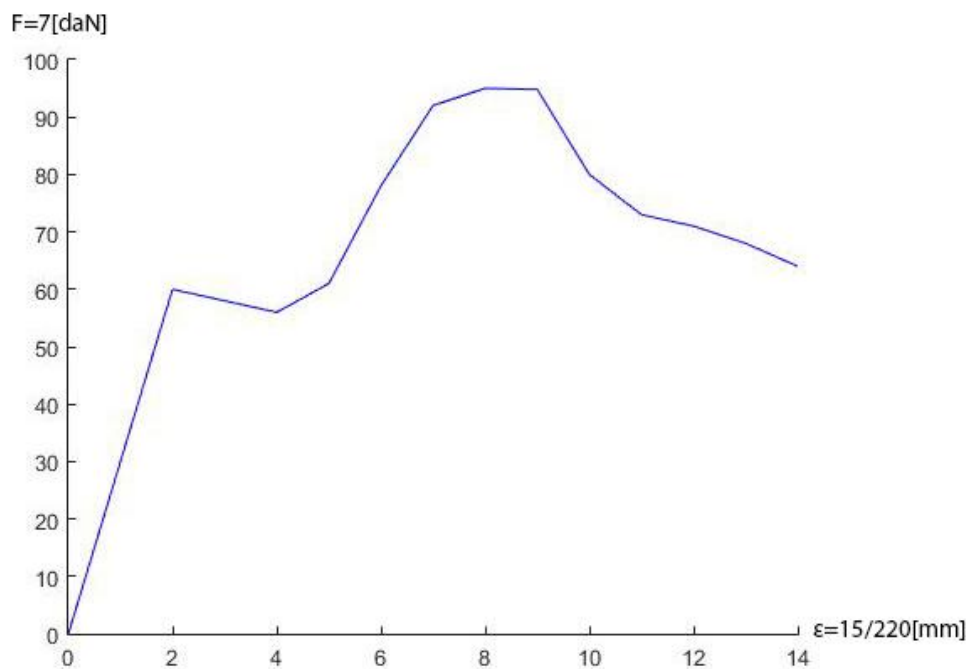
a)



b)



c)



d)

**Figure 2** : Courbes des essais de traction de chaque tôles d'avion a) DC3 ; b) Antonov An26 ; c) Tôle de type AG5 10/10 ; d) Tôle de type AG5 6//10.

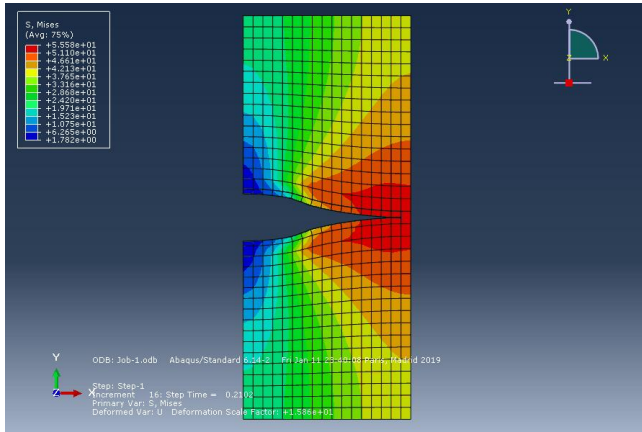
La ductilité de chaque matériau est directement approuvée par les allures de chaque courbe dans la zone plastique. Pourtant, on peut remarquer que les trois matériaux (tôle du DC3, AG5 10/10, AG5 6/10) sont peu ductiles par rapport à l'échantillon de la tôle d'un Antonov An26. D'autre part, les valeurs de chaque propriété élastique extraite de cette caractérisation sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau 1** : Propriétés élastiques de chaque matériau.

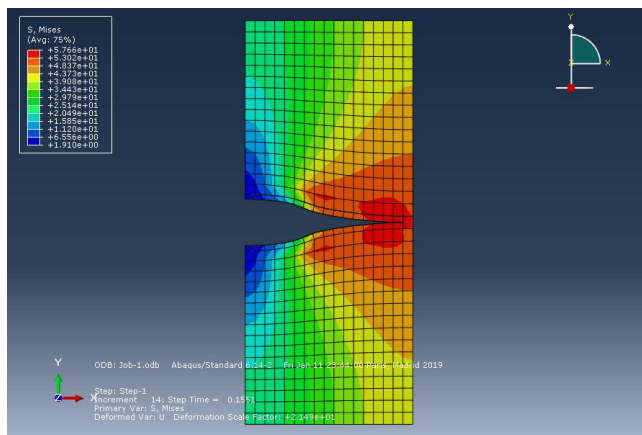
Caractéristiques	Coefficient de Poisson	Module d'Young [N/mm <sup>2</sup> ]
Tôle du DC3	0.025	37000
Tôle de l'Antonov An26	0.02	51250
Tôles AG5 10/10	0.01	102500
Tôles AG5 6/10	0.024	41666

Il est important de noter que le matériau AG5 10/10 dispose un module d'Young très important.

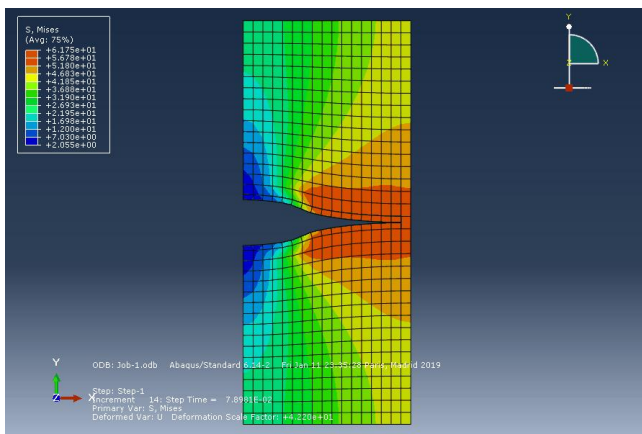
En se servant toujours de la machine de traction, nous avons entretenu des essais mécaniques jusqu'à la rupture totale de chaque échantillon. Nous pouvons alors observer visuellement la propagation de la fissure. Par ailleurs, dans la figure à gauche, nous avons aussi les résultats de simulations de la propagation de la fissure.

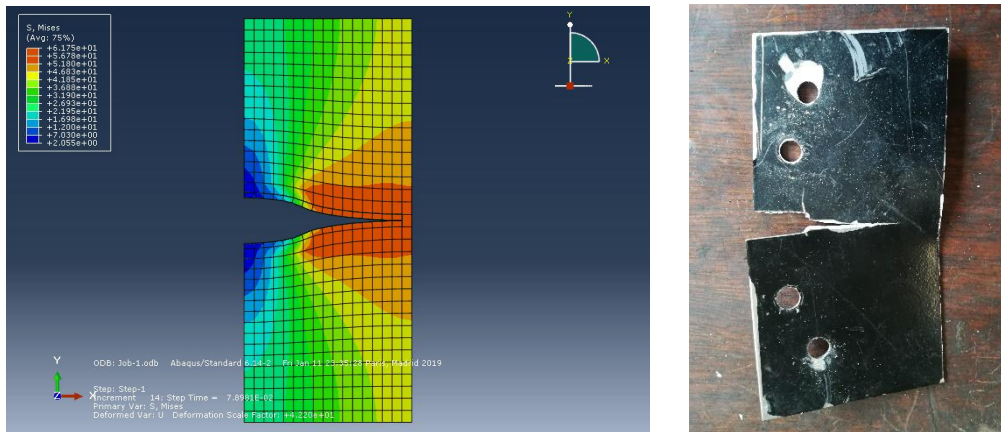


a)



b)





d)

**Figure 3** : Simulation et réalisation de la propagation de la fissure de chaque tôles d'avion a) DC3 ; b) Antonov An26 ; c) Tôle de type AG5 10/10 ; d) Tôle de type AG5 6//10.

Les différences entre les états de la fissure obtenue résident au niveau des valeurs des propriétés élastiques de chaque métal. Pourtant, nous pouvons remarquer, que la fissuration donne le même trajet que celui obtenue expérimentalement, avec une légère différence.

Le tableau suivant regroupe, premièrement les données pour la simulation de la propagation de la fissure, deuxièmement, les résultats de l'écartement de la fissure.

**Tableau 2** : Résultats de l'écartement de la fissure issus des sollicitations.

Types tôles	Force [daN] (Simulation et expérimentale)	Ecartement à l'ouverture [mm] (Simulation)	Rapport : Ecartement/ Force
Avion DC3	370	11.74	0.317
Avion Antonov An26	430	11.39	0.026
AG5 10/10	360	11.39	0.316
AG5 6/10	270	11.74	0.043

Les résultats des méthodes proposées convergent qualitativement. On peut aussi voir la faible ductilité des échantillons (tôle de DC3, tôle de type AG5 10/10), qui a été vérifié expérimentalement. Pour l'instant, ce résultat préliminaire nous est très utile. Il démontre la faisabilité de l'étude de la propagation de la fissure des métaux. L'étude mixte entre la simulation et les essais de traction entrepris ici, nous a fourni des résultats cohérents et prédit les mêmes observations.

### 3 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé une introduction de l'étude de la mécanique de l'endommagement mécanique des matériaux pour des applications aéronautiques (cas des avions sous des conditions climatiques tropicales). Une construction de module sous Abaqus® a été développée, pour entretenir la propagation de la fissure. D'autre part, des essais expérimentaux ont été aussi conduits afin de fournir un maximum de résultats. Ces derniers sont peu exhaustifs, pourtant, l'obtention des premières données, tant sur l'aspect théorique et expérimental, nous encourage à

approfondir la présente étude. Bien entendu, faute des matériels et de temps, le travail présenté n'est qu'une première approche. Il doit prolonger dans plusieurs directions. Une étude approfondie (caractérisation expérimentale sera nécessaire dans l'avenir en vue d'une conclusion plus parlante entre les dimensions réelles de la fissuration et le structure. Une simulation avec d'autres modèles plus sophistiqués sera nécessaire dans les discussions à mener ultérieurement.

## Références

- [1] Érembert NIZERY, « Amorçage et propagation des fissures de fatigue dans les alliages d'aluminium 2050-T8 et 7050-T7451 », thèse présentée devant l'INSA de Lyon pour obtenir le grade de docteur, 2015.
- [2] Matthew Jon Pais, « Variable amplitude fatigue analysis using surrogate models and exact xfem reanalysis », thèse présentée à l'école doctorale de l'université de Floride en vue de satisfaire partiellement aux exigences du diplôme de docteur en philosophie de l'université de Floride, 2011.
- [3] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/abaqus/>
- [4] <https://www.testwell.fr/>