

# Prise en compte des gradients de contrainte et d'écrouissage pour la prévision de la tenue en fatigue des pièces par une approche "non locale"

**P.Kanoute<sup>a</sup>, V.Bonnand<sup>a</sup>, R.Degeilh<sup>c</sup>, M.Kaminski<sup>a</sup>, S.Kruch<sup>a</sup>, A.Morançais<sup>b</sup>**

a. ONERA, 29 avenue de la Division Leclerc, Chatillon Cedex 92322,  
pascale.kanoute@onera.fr

b. Safran Aircraft Engines, Route Henri Auguste Desbruères, BP 81, 91003 Evry Cedex

c. EDF Lab, 7 Boulevard Gaspard Monge, 91120 Palaiseau Cedex

## Résumé

*L'analyse de la durée de vie de composants de structures complexes doit non seulement prendre en compte les aspects « matériaux », comme l'influence de la contrainte moyenne, mais aussi les effets liés à la géométrie de la pièce étudiée. En effet, les zones présentant de forts gradients mécaniques ne peuvent pas être traitées comme l'élément de volume et demandent une analyse particulière. Ce papier présente une démarche développée pour prendre en compte les effets des gradients de contraintes sur la durée de vie de composants de turbomachines comme les disques ou les aubes de turbines. Deux cas d'applications sont détaillés, le premier concerne une zone à concentration de contraintes subissant un fort chargement thermo-mécanique et le second la prise en compte d'un état de surface grenailé au niveau d'une zone à Kt sur le calcul de la durée de vie.*

## 1. Introduction

Les structures industrielles présentent souvent des concentrations de contrainte (trous, fentes, congés, etc ...) générant des gradients des champs mécaniques et constituant des sites privilégiés d'amorçage de fissures. A titre d'exemple, il peut être évoqué les trous de refroidissement en bord d'attaque d'une aube de turbine haute pression qui visent à créer, grâce à l'air s'écoulant par ces perforations, un film d'air plus froid autour de la pôle (technologie « film cooling »). Par ailleurs, pour retarder l'amorçage de fissures dans les zones à concentration de contrainte, des traitements de surface peuvent être utilisés afin d'introduire des contraintes résiduelles de compressions dans les couches superficielles. Ces procédés comme le grenailage à buse, par ultrason ou encore le SMAT vont générer un gradient d'écrouissage pouvant impacter la relaxation thermique [1] et mécanique de ces contraintes résiduelles. La modélisation et la prévision de la durée de vie des pièces industrielles impliquent donc de savoir prendre en compte ces gradients dans le calcul de durée de vie. L'hypothèse de l'état local communément admise en mécanique de milieux continus est mise en défaut dans ces zones critiques, conduisant généralement à une surestimation des risques d'amorçage. Dès les années 1970 les effets non locaux sont analysés notamment par Edelen et Eringen [2]. Par la suite, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet du gradient de contrainte ou de la déformation notamment en fatigue. Les modèles proposés pour prendre en compte ces effets non

locaux se classent en deux catégories, les méthodes « volumiques » et les méthodes à gradient. Nous pouvons ainsi citer le modèle à gradient du premier ordre de Papadopoulos [3] basé sur une modification du critère de limite de fatigue de Crossland en introduisant directement dans le critère la norme du gradient de pression hydrostatique. Plus tard, différents auteurs ([4]-[6]) ont développé des travaux dans le même esprit. D'autres auteurs ont travaillé sur des approches plutôt basées sur le calcul du second gradient ou du laplacien de la variable à rendre non locale. Il existe des modèles à gradient explicite ou implicite dont [7] à [10]. Le besoin d'insérer cette modélisation non locale dans une chaîne de prévision de durée de vie existante associée à des identifications des modèles de comportement et d'endommagement peut conduire à privilégier les méthodologies de type moyenne volumique car elles sont moins intrusives. Les travaux présentés visent au travers de deux cas différents à discuter l'applicabilité et la représentativité de ce type d'approche en regard d'essais sur éprouvettes tubulaires multiperforées et sur éprouvettes à Kt grénaillées en superalliage monocristallin base nickel pour une application aube de turbine.

## **2. Prise en compte des effets de gradient**

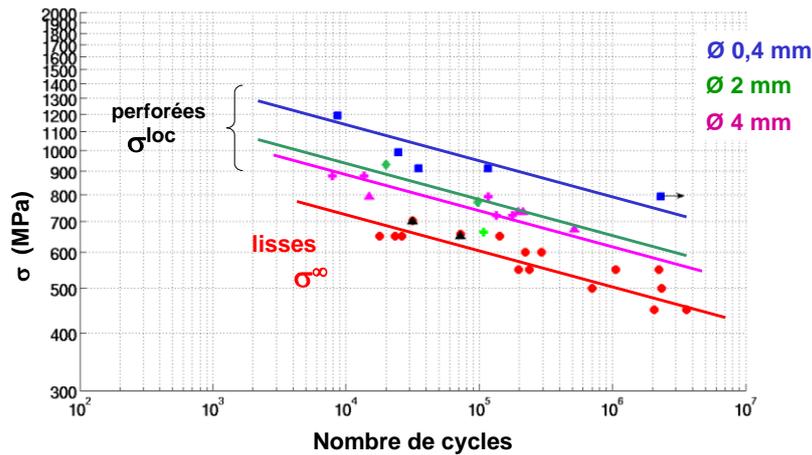
### **2.1 Présentation de l'approche appliquée**

Les méthodes « volumiques » font partie des méthodologies de type épaisseur de couche critique. Devaux [11] propose ainsi un critère basé sur le calcul de variation sur un cycle de la contrainte normale à une certaine profondeur. Flavenot et al. [12] prennent en compte dans le calcul en fatigue, les contraintes à une certaine épaisseur de couche critique. Un peu plus tard la méthode de moyenne volumique est proposée par Pijautier-Cabot et Bazant [13]. L'école Anglo-saxonne autour de Taylor [14] compare ces approches qui utilisent la contrainte à une certaine distance, moyennée sur une ligne, ou sur une surface. Parmi les critères de fatigue proposés, nous pouvons citer le critère de volume effectif de Pluvinage [15], le concept de volume maximum contraint de Sonsino [16]. Enfin, le critère de fatigue multiaxiale de Palin-Luc [17] utilise le concept de volume d'influence autour du point critique. La méthode que nous exploiterons ici sur deux cas d'étude types repose sur ce concept de moyennisation sur une variable d'intérêt comme la contrainte, le dommage ou tout autre variable pertinente. Une simplification faite dans notre cas sera de considérer que la fonction de forme intervenant dans le champ régularisé a une densité uniforme sur l'intervalle de moyennisation alors qu'elle est nulle ailleurs.

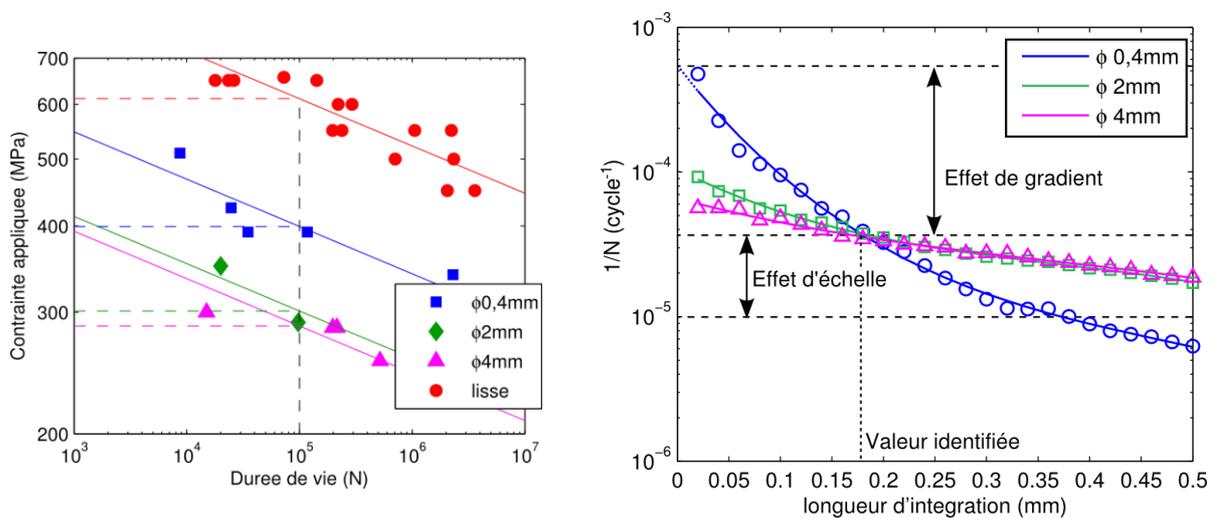
### **2.2 Principe d'identification de la longueur d'intégration**

Le point commun aux différentes approches non locales est la caractérisation du paramètre non local assimilé le plus souvent à une longueur interne du matériau. Une méthode d'identification par méthode inverse est ainsi proposée par Kaminski [18] en s'appuyant sur des essais de fatigue sur plaques perforées pour le superalliage monocristallin base nickel AM1 à 950°C. L'exploitation de cette base construite pour différentes tailles de trous et différentes épaisseurs, afin de garantir un même état de multiaxialité au bord du trou, met alors en évidence un amorçage d'autant plus précoce que la taille du trou est grande (Fig1), expliqué par un effet de gradient de contrainte. Ces essais font apparaître également un effet d'échelle, plutôt du second ordre, lié à un amorçage sur éprouvettes lisses systématiquement sur porosités alors que ce mode d'amorçage n'est pas observé sur les éprouvettes perforées. La méthode de détermination de la longueur caractéristique se fait alors en deux étapes. En supposant une évolution linéaire de la durée de vie en fonction de la contrainte nominale appliquée dans un diagramme bi-logarithmique, on définit pour une durée de vie de référence, typiquement ici  $10^5$  cycles, pour chaque taille de trou, le chargement à appliquer

conduisant à cette durée de vie de référence. On applique ensuite la chaîne de calcul de durée de vie sur ces différents cas. La moyenne volumique est alors réalisée sur le champ de dommage ( $1/N_f$ ) pour différentes longueurs d'intégration. La longueur caractéristique est obtenue lorsque les trois tailles de trous ont une même durée de vie (Fig2.). Par ailleurs, l'écart à la durée de vie de référence  $10^5$  cycles, assimilé à un effet de volume conduit à définir par méthode inverse la référence du matériau fictif sans porosité. La méthode illustrée ici en moyennant le dommage peut s'appliquer sur d'autres quantités, comme la contrainte, conduisant alors à une identification de cette longueur caractéristique indépendamment du modèle d'endommagement et ainsi offrir l'exploitation d'une telle approche non locale dans un processus multi-niveau de dimensionnement.



**Figure 1.** Résultats expérimentaux sur éprouvettes perforées en AM1 exprimées en contrainte maximale locale

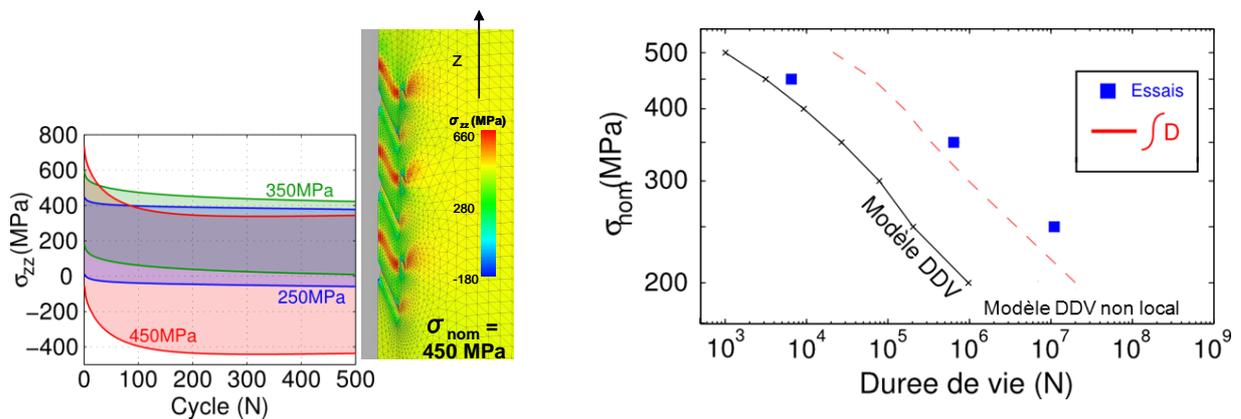


**Figure 2.** Détermination de la longueur d'intégration : a) calcul des niveaux d'effort à appliquer pour atteindre 105 cycles ; b) Identification de la longueur interne

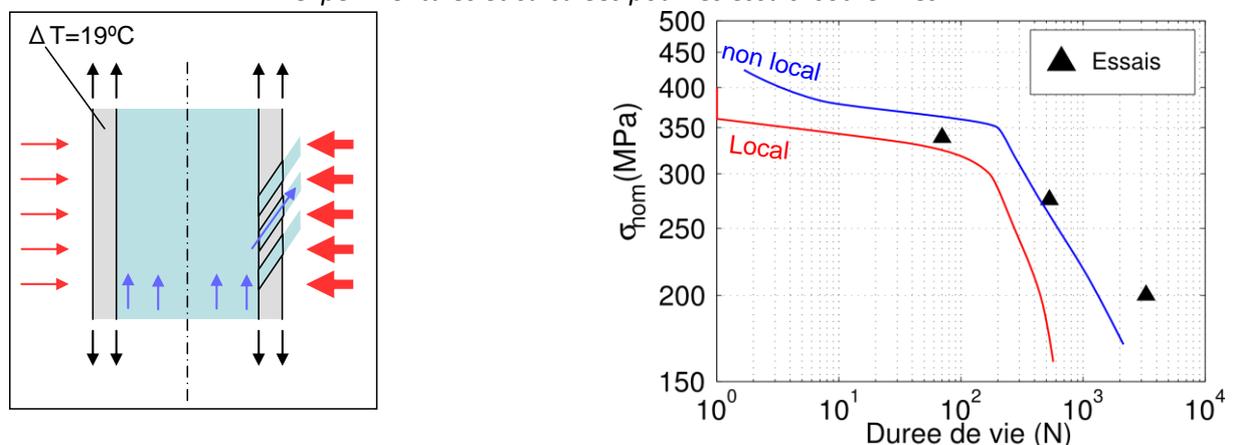
De la même manière, il a pu être démontré que pour une même valeur de longueur caractéristique nous pouvons obtenir une estimation pertinente de la durée de vie sur des éprouvettes entaillées ou présentant une concentration de contraintes de type fente. Nous nous sommes donc intéressés à son exploitation dans des cas plus complexes.

### 3. Essais sur tubes troués en chargement de traction, traction-torsion

Le premier cas analysé correspond à un tube en AM1 présentant un réseau de perforations soumis à des sollicitations de complexité croissante visant à simuler des cas de chargement type rencontrés sur aubes de turbine haute pression. La première série d'essais réalisée dans le cadre de la thèse de Degeilh [19] à une température uniforme de 950°C vise à valider la chaîne de calcul de durée de vie non local. Un chargement sinusoïdal répété à 5Hz est appliqué sur l'éprouvette suivant l'axe z (Fig3), direction de solidification <001> du matériau. Du fait de la très lente évolution de l'endommagement de fatigue, l'analyse de la durée de vie repose sur une approche découplée entre le comportement et l'endommagement. Le modèle d'endommagement à amorçage de fissure est donc appliqué en post-traitement sur un état mécanique stabilisé. Le matériau qui présente un comportement anisotrope est décrit par le modèle de plasticité cristalline de Meric-Cailletaud avec prise en compte des mécanismes de restauration statique à haute température. Il peut être observé (Fig3) qu'environ 500 cycles sont nécessaires pour atteindre un état mécanique stable. Le modèle d'endommagement développé à l'Onera en interaction fatigue-fluage basé sur les contraintes est donc appliqué en post-traitement systématiquement sur le 500ième cycle. L'application des approches locale et non locale est représentée sur la figure 4b. L'analyse est faite ici sans tenir compte d'un éventuel effet d'échelle comme explicité au paragraphe 2.2.



**Figure 3.** a) Champs de contrainte en zone de perforation ; b) Comparaison des durées de vie expérimentales et calculées pour les essais isothermes

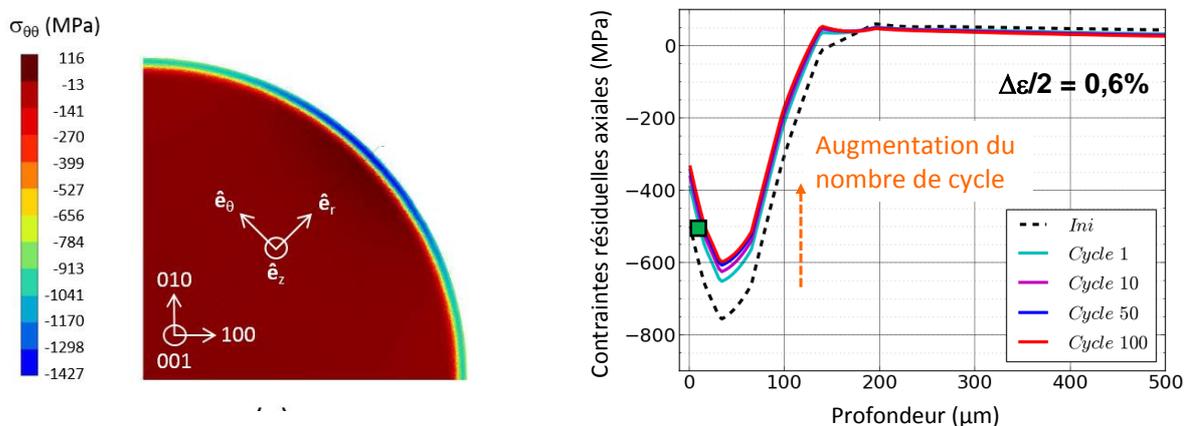


**Figure 4.** a) Schéma de principe de l'essai ; b) Comparaison des durées de vie calculées et expérimentales pour les essais avec gradient thermique de paroi

Dans le cas d'une sollicitation de fatigue de type mission (vis-à-vis des chargements thermique et mécanique imposés) avec gradient thermique de paroi et comme schématisée sur la figure 4a, l'analyse non locale fournit à nouveau des estimations bien plus cohérentes vis-à-vis des résultats d'essais. Le modèle macroscopique Onera d'interaction Fatigue-Fluage est néanmoins mis en défaut par Bonnard [20] en torsion, expliquée par une anisotropie matérielle de la contrainte à rupture. Le modèle de fatigue anisotrope et incrémental proposé par Kaminski [18] qui couple plasticité et endommagement a été alors appliqué sur des tubes perforés en AM1 soumis à un chargement de fatigue en traction-torsion. Il a été alors montré, avec une toute autre classe de modèle, l'apport significatif de l'approche non locale vis-à-vis de l'estimation de la durée de vie de ces tubes.

### 3. Gradient de contrainte et d'érouissage sur éprouvette à Kt grénaillée en AM1

Le second cas d'étude porte sur la prévision de la durée de vie en fatigue d'éprouvettes à Kt (1.32 et 1.6) en AM1 préalablement grénaillées. Le facteur de concentration de contraintes le plus fort est défini de manière à être représentatif des congés situés au niveau du pied d'une aube de turbine. Le grénaillage par ultrason est ici considéré. Les traitements de grénaillage vont induire en plus d'un gradient de contraintes résiduelles à la surface de l'échantillon, un gradient d'érouissages qui pourra influencer grandement la relaxation thermo-mécanique en service des contraintes. La détermination des contraintes résiduelles se fait couramment dans les polycristaux à l'aide de la technique de diffraction des rayons X et la méthode des  $\sin^2\psi$ , qui ne peut néanmoins s'appliquer pour un monocristal. En s'appuyant sur la méthode d'Ortner [21], l'état de contraintes résiduelles est alors évalué sur le superalliage monocristallin après grénaillage [22]. La caractérisation du gradient d'érouissage est encore plus délicate. Différentes techniques expérimentales sont alors utilisées pour déterminer cet érouissage. Les mesures de dureté Vickers à la surface de l'échantillon grénaillé de même que la cartographie des désorientations par EBSD permettent de localiser la zone érouie par le procédé. Mais afin de remonter à une grandeur quantitative de l'érouissage, les évolutions des largeurs intégrales des pics de diffraction sont couplées à une méthode de calibration comme proposée par Prevey [1].



**Figure 1.** Graphe très intéressant et très bien choisi

Cet état mécanique est ensuite introduit dans la pièce d'intérêt. Pour cela, est utilisée la méthode d'introduction du champ d'eigenstrain [23] qui est ensuite étendue pour rendre compte de

l'anisotropie matérielle et introduire les variables d'écroissage sur la zone impactée par le grenailage. A titre d'exemple la figure 5 illustre sur une éprouvette cylindrique l'anisotropie vis-à-vis des contraintes résiduelles circonférentielles introduites selon les directions [100] et [110] en cohérences avec les mesures faites par la technique de diffraction des rayons X. Le chargement appliqué correspond à une sollicitation de fatigue en contrainte imposée à 650°C. Un des points critique de l'analyse dans ce cas là porte sur la nécessité pour le modèle de comportement de retranscrire de manière pertinente la relaxation, notamment partielle, des champs mécaniques résiduels (contraintes et écroissage) en cohérence avec les observations expérimentales. La chaîne de calcul de durée de vie est alors appliquée avec la même approche consistant à moyennner les champs afin de rendre compte des gradients de contrainte et d'écroissage. Les résultats obtenus (figure 6) montrent deux régimes. Au dessus d'une contrainte nominale seuil, le gain de durée de vie après grenailage, augmentant avec la concentration de contrainte, est parfaitement retranscrit par la modélisation non locale proposée. Au contraire, en dessous de ce seuil un effet délétère du grenailage apparaît qui pourrait être induit par un mécanisme de pré-endommagement lié au traitement de surface.

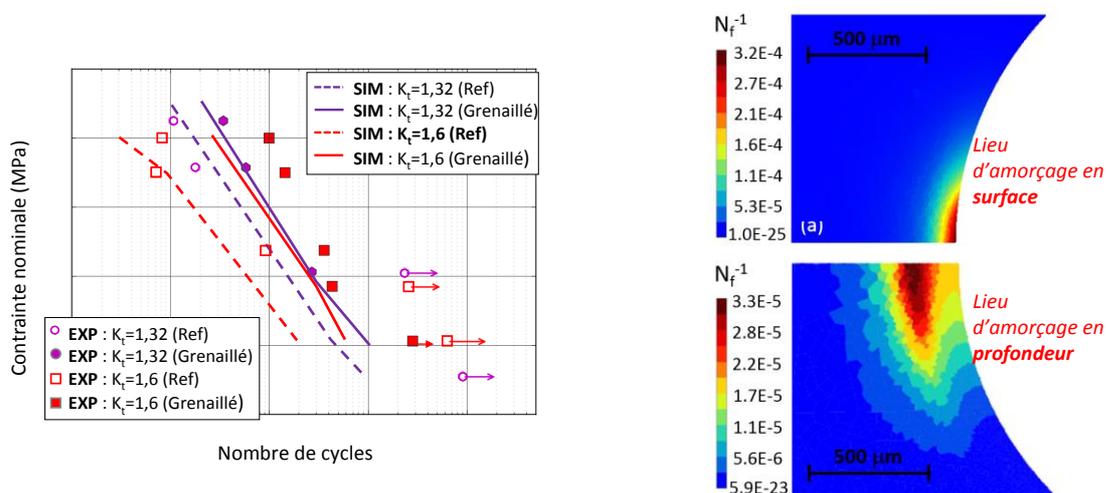


Figure 6. Graphe très intéressant et très bien choisi

## 4. Conclusion

Nous avons montré que le calcul de la durée de vie d'une structure complexe doit prendre en compte certaines spécificités liées à la géométrie analysée et/ou aux différents traitements de surface subis. En particulier, la présence de gradients de contraintes demande le développement d'approches non locales de l'endommagement. Cette approche a été appliquée avec succès sur l'analyse de la durée de vie en deux endroits différents d'une aube de turbine en superalliage monocristallin AM1. La première zone analysée se situe au niveau des trous de refroidissement de la pale, zone qui est le lieu de forts chargements thermo-mécaniques et la seconde au niveau du pied de l'aube qui subit un traitement de surface de grenailage induisant ainsi des contraintes résiduelles sur une zone à Kt qu'il est nécessaire de bien prendre en compte dans l'analyse.

Cette approche non locale a permis de comprendre les observations expérimentales et d'affiner les prévisions de la durée de vie de ces structures.

## Remerciements

Les auteurs remercient la coopération SAFRAN et le support financier de la DGAC (Direction des Programmes de l'Aviation Civile) accordé à ces travaux.

## Références

- [1] P.S. Prévay, The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced in 718, Tech.rep, DTIC Document, 2000.
- [2] A.C. Eringen, D.G.B. Edelen, Int.J.Engineering Science, 10:233-248, 1972.
- [3] I.V. Papadopoulos, Invariant formulation of a gradient dependent multiaxial high-cycle fatigue criterion, Eng. Fract.Mech, 55: 513-528, 1996.
- [4] Y. Nadot, T.Billadeau, Multiaxial fatigue limit criterion for defective materials.Eng.Fract.Mech, 73, 2006.
- [5] F. Morel, A.Morel, Y. Nadot, Comparison between defects and micro-notches in multiaxial fatigue – The size effect and the gradient effect, Int. J. Fatigue, 31:263-275, 2009.
- [6] R. Armagier, S. Fouvry, L.Chambon, C.Schwob, .C. Poupon, Stress gradient effect on crack initiation in fretting using a multiaxial fatigue framework., Int.J. Fatigue, 32: 1904-1912, 2010.
- [7] E.C. Aifantis, On the microstructural origin of certain inelastic models, Int.J.Fatigue, 32:1904-1912, 1984.
- [8] R.H. J. Peerlings, R. De Borst, W.A.M. Brekelmans et J.H.P. Devree, Gradient enhanced damage for quasi-brittle materials, Int. J. Num.Meth.Eng, 39:3391-3403, 1996.
- [9] R. A.B. Engelen, M.G.D. Geers, F.P.T Baaijens, Nonlocal implicit gradient-enhanced elasto-plasticity for the modelling of softening behaviour. Int.J. Plasticity, 19:403-433, 2003.
- [10] S. Feld Payet, J. Besson, F.Feyel, Int.J. Damage.Mech, 20:665-680, 2011.
- [11] J.C.Devaux, Y.C. D’escatha, J.L. Bernard, Pellisier-Tanon A, A criterion for analysing fatigue crack initiation in geometrical singularities, Pressure Vessel Technology, 211-222, 1980.
- [12] J. F. Flavenot, N. Skalli. L’epaisseur de couche critique ou une nouvelle approche du calcul en fatigue des structures soumises à des sollicitations multiaxiales. Mec. Mater. Electr, vol. 397, pages 15–25, Jan-Feb, 1983.
- [13] G. Pijaudier-Cabot, Z. P. Bazant. Non local damage theory, J. Eng.Mech, 113(10), 1512-1533, 1987.
- [14] D. Taylor. Geometrical Effects in fatigue : a unifying theoretical model, Int J. Fatigue, 1999.
- [15] G. Pluinage, H. Adib. Theoretical and numerical aspects of the volumetric approach for fatigue life prediction in notched components. Int.J. Fatigue, vol. 25 n ° 1, pages 67–76, Jan. 2003.
- [16] C. M. Sonsino, H. Kaufmann & V. Gubrisic. Transferability of material data for the example of a randomly loaded truck stub axle. SAE Tech. Paper Series (970708), pages 1–22, 1997.
- [17] T. Palin-Luc, S. Lasserre, An energy based criterion for high cycle multiaxial fatigue, Eur. J. Mechanics, A/Solids, 17(2), 237-251, 1998.
- [18] M. Kaminski, Modelisation de l’endommagement en fatigue des superalliages monocristallins pour aubes de turbines en zone de concentration de contrainte, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [19] R. Degeilh, Développement expérimental et modélisation d’un essai de fatigue avec gradient thermique de paroi pour application aube de turbine monocristalline, Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 2013.
- [20] V. Bonnard, Etude de l’endommagement d’un superalliage en fatigue thermo-mécanique multiaxiale, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [21] B. Ortner, The choice of lattice planes in X-ray strain measurements of single crystals, Advances in X-ray analysis, 29, 113-118, 1983.
- [22] A. Morancais, M.Fèvre, M. Francois, N Guel, S.Kruch, P.Kanouté and A. Longuet, Journal of applied crystallography, 48.6, 2015.
- [23] F.Ahdad, M. Desvignes, Contraintes résiduelles et déformations plastiques, leurs relations mutuelles pour des pièces de géométrie simple, Matériaux et Techniques, 5-6, 46-50, 1996.