

***MECAMAT***

**Réunion du Groupe de Travail MECAMAT  
Physique et Mécanique de l'Endommagement et de la Rupture**

**Mardi 14 juin 2005  
à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique  
(site du Futuroscope de Poitiers)  
amphi A12**

**Thème :**

**ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE DES STRUCTURES :  
AVANCEES RECENTES EN MODELISATION,  
VALIDATIONS EXPERIMENTALES ET APPLICATIONS**

La modélisation de la durée de vie sous chargement répété est un sujet déjà ancien : premières approches en contraintes au début du XX<sup>e</sup> siècle, extension à la plasticité dans les années 1940, tolérance à des fissures pré-existantes en 1960 et, depuis, raffinement des modèles. Même si ces approches sont disponibles dans les codes de calcul et largement utilisées dans l'industrie, la prévision de la durée de la vie n'est toujours pas satisfaisante, notamment dans le cas des chargements multi-axiaux non proportionnels entre 100 000 cycles et le seuil d'endurance. Aux difficultés de modélisation vient en plus s'ajouter une très grande dispersion expérimentale. Finalement, l'emploi des outils prédictifs actuels peut conduire à des résultats variant de 1 à 10 ; ces incertitudes ne sont plus acceptables dans un contexte de sûreté ou de concurrence économique forte : le besoin de recherche sur le sujet reste plus que jamais d'actualité. Parmi les problèmes ouverts, on peut citer entre autres :

- la prise en compte d'une faible plasticité macroscopique – observée expérimentalement dans la gamme de cycles mentionnée ci-dessus – qui soulève la question du choix d'un bon modèle de comportement cyclique ;
- l'extension aux aciers austénitiques des nombreux travaux dédiés aux ferritiques car des phénomènes nouveaux liés au sur-écrouissage font alors leur apparition ;
- le faïençage thermique, les difficultés expérimentales associées et les liens avec la fatigue mécanique ;
- l'effet de l'état de surface et ses conséquences à travers la rugosité (micro-singularités géométriques), l'écrouissage et les contraintes résiduelles ;
- l'effet des contraintes résiduelles liées aux opérations de soudage ;
- les problèmes de fatigue associée aux contacts entre pièces...

La réunion du Groupe de Travail a pour but de faire le point sur les différentes approches visant à modéliser l'endommagement par fatigue, leur validation et leurs applications.

Les organisateurs :

Eric LORENTZ (EDF, Clamart)

Damien HALM (ENSMA, Poitiers)

# PROGRAMME

9h15 *Accueil des participants - Café*

9h30 ***Problèmes en fatigue dans l'industrie aéronautique***  
L. Chambon (EADS CCR, Suresnes)

10h00 ***Modélisations de l'endommagement mésoscopique des polycristaux sous sollicitations cycliques biaxiales***  
A. Abdul-Latif (L3M, Tremblay-en-France)

10h30 ***Modélisation de l'endommagement d'un acier ferrito-perlitique en fatigue multiaxiale polycyclique***  
L. Flacelière (CEA, Le Ripault), F. Morel (ENSAM, Angers), A. Dragon (LMPM, Poitiers)

11h00 *Pause Café*

11h15 ***Approche micro-macro de la fatigue polycyclique***  
V. Monchiet, E. Charkaluk, D. Kondo (LML, Lille)

11h45 ***Approche variationnelle de la fatigue***  
J.J. Marigo (LMM, Paris VI)

12h15 *Repas*

14h00 ***Le faïençage thermique et l'effet de pré-écrouissage en déformation et en contrainte contrôlées***  
S. Taheri (LaMSID, Clamart)

14h30 ***Une approche probabiliste de la formation et de la propagation de réseaux de fissures en fatigue thermique***  
N. Malésys (LMT, Cachan – CEA, Saclay), L. Vincent (CEA, Saclay), F. Hild (LMT, Cachan)

15h00 ***Une approche probabiliste pour l'étude de la fatigue multiaxiale***  
C. Doudard (LMT, Cachan), S. Calloch (ENSIETA, Brest), F. Hild (LMT, Cachan)

15h30 *Pause Café*

15h45 *Dispersion des contraintes dans les polycristaux et germination des fissures de fatigue à grand nombre de cycles*  
M. Sauzay, T. Jourdan (CEA, Saclay)

16h15 *Prise en compte de la géométrie des défauts de surface dans un critère d'endurance multiaxial*  
Y. Nadot, T. Billaudeau, H. Gadouini (LMPM, Poitiers)

17h00 *Clôture de la journée*

## LISTE DES PARTICIPANTS

***Akrum ABDUL-LATIF***

L3M, Tremblay-en-France  
aabdul@iu2t.univ-paris8.fr

***Laurence BODELOT***

LML, Lille  
Laurence.Bodelot@polytech-lille.fr

***Florent BRIDIER***

LMPM, Poitiers  
florent.bridier@lmpm.ensma.fr

***Laurent CHAMBON***

EADS CCR, Suresnes  
laurent.chambon@eads.net

***Cédric DOUDARD***

LMT, Cachan  
doudard@lmt.ens-cachan.fr

***Philippe DUFRENOY***

LML, Lille  
philippe.Dufrenoy@polytech-lille.fr

***Hicham GADOUINI***

LMPM, Poitiers  
gadouini@lmpm.ensma.fr

***Michel GERLAND***

LMPM, Poitiers  
michel.gerland@lmpm.ensma.fr

***Damien HALM***

LMPM, Poitiers  
halm@lmpm.ensma.fr

***Patrice LONGERE***

LG2M, Lorient  
patrice.longere@univ-ubs.fr

***Nicolas MALESYS***

LMT, Cachan  
malesys@lmt.ens-cachan.fr

***Vincent MONCHIET***

LML, Lille  
Vincent.Monchiet@polytech-lille.fr

***Gérard BEZINE***

LMPM, Poitiers  
bezine@lmpm.ensma.fr

***Pierre-Olivier BOUCHARD***

CEMEF, Sophia-Antipolis  
pierre-olivier.bouchard@ensmp.fr

***Sylvie CASTAGNET***

LMPM, Poitiers  
castagnet@lmpm.ensma.fr

***Eric CHARKALUK***

LML, Lille  
eric.charkaluk@univ-lille1.fr

***André DRAGON***

LMPM, Poitiers  
dragon@lmpm.ensma.fr

***Laurent FLACELIERE***

CEA, Le Ripault  
laurent.flaceliere@cea.fr

***Catherine GARDIN***

LMPM, Poitiers  
gardin@lmpm.ensma.fr

***Jean-Claude GRANDIDIER***

LMPM, Poitiers  
grandidier@lmpm.ensma.fr

***Gilbert HENAFF***

LMPM, Poitiers  
gilbert.henaff@lmpm.ensma.fr

***Eric LORENTZ***

EDF, Clamart  
eric.lorentz@edf.fr

***Jean-Jacques MARIGO***

LMM, Paris VI  
marigo@lmm.jussieu.fr

***Yves NADOT***

LMPM, Poitiers  
yves.nadot@lmpm.ensma.fr

**Thierry PALIN-LUC**  
LAMEFIP, Bordeaux  
thierry.palin-luc@lamef.bordeaux.ensam.fr

**Laurent SABATIER**  
LML, Lille  
laurent.sabatier@univ-lille1.fr

**Maxime SAUZAY**  
CEA, Saclay  
sauzay@cea.fr

**Saïd TAHERI**  
EDF, Clamart  
said.taheri@edf.fr

**Ludovic VINCENT**  
CEA, Saclay  
ludovic.vincent@cea.fr

**Ahmed EL BARTALI**  
Ecole Centrale, Lille  
ahmed.elbartali@ec-lille.fr

**Jérôme LAVERNE**  
EDF, Clamart  
jerome.laverne@edf.fr

**André JAUBERT**  
LPMTM, Paris XIII  
jaubert@galilee.univ-paris13.fr

**Octavian POP**  
LMS, Poitiers  
octavian.pop@lms.univ-poitiers.fr

**Nicolas SAINTIER**  
LAMEFIP, Bordeaux  
nicolas.saintier@lamef.bordeaux.ensam.fr

**Jean-Michel STEPHAN**  
EDF, Moret-sur-Loing  
jean-michel.stephan@edf.fr

**Patrick VILLECHAISE**  
LMPM, Poitiers  
p.villechaise@lmpm.ensma.fr

**Ondrej KOTECKY**  
Ecole Centrale, Lille  
ondrej.kotecky@ec-lille.fr

**Fabrice MONTEBAULT**  
CNAM-ITMA, Paris  
fabrice.montembault@cnam.fr

## **RESUMES DES COMMUNICATIONS**

# **Problèmes en fatigue dans l'industrie aéronautique**

*Laurent CHAMBON*

*EADS CCR - 12 rue Pasteur – 92152 SURESNES*

Le calcul en fatigue (au sens large incluant l'amorçage et la propagation de défauts) reste un problème délicat pour les bureaux d'études aéronautiques, en dépit de l'avancement très significatif des connaissances dans le domaine. Les performances sont limitées dans certains cas par la qualité des modèles (de comportement, d'endommagement, ou numériques) disponibles, mais aussi par la complexité de mise en œuvre, qui conduit à l'utilisation de règles semi-empiriques très dépendantes des essais. L'amélioration des calculs de durabilité reste un enjeu important pour l'industrie aéronautique, car la durabilité des structures a une influence directe et prépondérante sur la sécurité et le coût d'utilisation des appareils (essentiels pour les avions et hélicoptères), et un impact significatif sur les performances (pour tous les produits, y compris spatiaux).

La présentation est faite du point de vue de l'utilisateur final. Après un bref aperçu des méthodes couramment utilisées en bureaux d'études aéronautiques pour calculer les durées de vie, les limites de ces méthodes et les besoins émergents sont présentés. Quelques exemples de solutions mises en œuvre par EADS CCR au profit des constructeurs (Airbus et Eurocopter notamment) apportent un éclairage sur les actions de développement.



# Modélisations de l'Endommagement Méso-copique des Polycristaux sous Sollicitations Cycliques Biaxiales

**A. ABDUL-LATIF**

*Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Modélisation (L3M)*

*93290 Tremblay-en-France*

*aabdul@ju2t.univ-paris8.fr*

Sur la base de travaux notamment d'Abdul-Latif et Saanouni (de 1994 à 1999), il a été constaté que pour mieux prévoir le comportement mécanique des polycristaux en fatigue plastique oligocyclique, une nouvelle démarche devient nécessaire. Il s'agit de la détermination du comportement élastique à l'échelle granulaire. Grâce à cette démarche, le comportement élasto-inélastique d'un grain devient ainsi entièrement prévisible, ce qui n'est pas le cas avec le modèle de Cailletaud. De plus, afin de ne pas dénuier de sens physique ce type de modélisation, il est nécessaire de tenir compte de l'influence de l'énergie élastique granulaire. En effet, une micro-fissure intragranulaire est toujours noyée au sein d'un grain ayant un comportement élasto-inélastique. Il est par conséquent tout à fait nécessaire et raisonnable, tout au moins pour l'auteur, de prendre en compte l'effet de l'énergie élastique emmagasinée dans ce milieu déformable selon l'évolution d'une telle micro-fissure. A noter que l'approche initialement proposée (Abdul-Latif et Saanouni, 1994, 1996, 1997, 1999) s'intéresse plutôt aux matériaux métalliques, comme le Waspaloy, où l'endommagement en fatigue se localise au niveau des systèmes de glissement. Celle-ci est, bien évidemment, incapable de décrire le comportement endommageable des polycristaux métalliques en fatigue durant lequel l'amorçage ne se produit pas au niveau des systèmes de glissement, comme il a été déjà observé, par exemple, pour l'aluminium 2024.

Maintenant, la problématique essentielle est liée à la recherche d'une (ou plusieurs) variable interne scalaire d'endommagement et de sa loi d'évolution résidant dans la détermination de la force associée à cette variable. Le présent travail apporte une réponse, quoique partielle, à ce problème.

En se basant sur la limitation de l'approche proposée auparavant, un élargissement du champ d'applications du modèle est judicieusement effectué tout en considérant que l'élasticité et l'endommagement sont déterminés uniquement au niveau méso-copique (granulaire).

Une des voies possibles de modélisation consiste ainsi à développer plusieurs aspects: (1) traiter l'élasticité à l'échelle granulaire permettant, par conséquent, de prendre en compte son énergie dans la cinétique de l'endommagement; (2) introduire une variable scalaire d'endommagement granulaire ( $d^g$ ) se développant au sein des grains pour un matériau polycristallin; (3) proposer un nouveau critère d'endommagement granulaire dépendant aussi bien de la déformation plastique granulaire cumulée que de la forme du trajet de chargement appliqué; (4) développer un nouveau critère d'amorçage à l'échelle macroscopique via l'approche probabiliste de Weibull. Ceci nous donne à la fin une approche mixte (*micromécanique-probabiliste*).

En ce qui concerne l'application du modèle, les calculs numériques sont réalisés en utilisant plusieurs agrégats de grains sous chargements cycliques simples et complexes. Les résultats concernant quelques réponses qualitatives obtenues sont très encourageants. Finalement, les confrontations quantitatives de ce modèle avec l'aluminium 2024 montrent clairement sa capacité à décrire essentiellement l'endommagement.

# **Modélisation de l'endommagement d'un acier ferrito-perlitique en fatigue multiaxial polycyclique**

*L. FLACELIERE\* , F. MOREL\*\* , A. DRAGON\*\*\**

*\* CEA Le Ripault – DAM/DMAT/SR2C/LMC – B.P. 16 37260 MONTS*

*\*\* ENSAM - 2, boulevard du Ronceray, B.P. 93525, 49035 ANGERS CEDEX*

*\*\*\* LMPM – ENSMA, UMR CNRS 6617, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex*

Ce travail est dédié à l'étude de l'endommagement en fatigue polycyclique sous sollicitations multiaxiales, suivant deux objectifs principaux. Le premier est la caractérisation expérimentale de cet endommagement, pour des sollicitations simples (traction et torsion), mais également l'étude du cumul de dommage, en particulier par des séquences de chargement reposant sur des blocs de sollicitations différentes. Le second objectif est l'utilisation du contexte de la mécanique de l'endommagement afin de proposer une nouvelle modélisation des phénomènes observés.

Etablies dans un cadre thermodynamique, suivant une description à l'échelle mésoscopique de la plasticité cyclique et un couplage fort avec les variables décrivant le dommage cristallin, c'est en fait trois modélisations qui sont proposées. L'augmentation graduelle de leur complexité est la conséquence de la prise en compte d'un nombre croissant de phénomènes : amorçage, propagation en mode II, bifurcation, puis bifurcation en mode I, et enfin ruine du cristal. De plus, en utilisant une description considérant la direction privilégié du glissement au sein du système activé, il est possible d'établir une description orientée de l'évolution des caractéristiques mécaniques du cristal. Une approche probabiliste est également proposée au sein de ces modélisations.

## **Approche micro-macro de la fatigue polycyclique**

***Vincent MONCHIET, Eric CHARKALUK, Djimedo KONDO***

*L.M.L.-UMR CNRS 8107, U.S.T.L., Bd. Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex*

La localisation de la déformation plastique est reconnue comme un des micromécanismes précurseurs de la rupture des métaux et des alliages dans des conditions de sollicitations polycycliques. A l'échelle microscopique, sous ce type de sollicitations, certains grains défavorablement orientés subissent un écoulement plastique. Une démarche de modélisation visant à intégrer au mieux les micromécanismes de déformation pour élaborer un critère d'endurance illimitée a été proposée et formalisée par Dang Van puis Papadopoulos.

Bien que le critère issu de ces travaux soit largement utilisé pour le dimensionnement de structures en fatigue, l'activité plastique seule ne permet pas d'expliquer certains aspects de la fatigue et en particulier la nucléation des fissures. L'étude réalisée se place dans le cadre de la démarche de Dang Van et Papadopoulos dans laquelle on incorpore des micromécanismes d'endommagement (nucléation et croissance de microcavités à l'intérieur des murs de dislocation où l'activité plastique est particulièrement intense) mis en évidence par certains auteurs (cf. [1]) à l'échelle des Bandes de Glissement Persistantes (BGP).

Elle s'articule autour des trois points suivants :

- une description du comportement plastique local des grains sollicités
- une modélisation des phénomènes de micro-endommagement (au sein des BGP) et la proposition d'un critère d'endurance illimitée en fatigue multiaxiale; cette proposition est basée sur une condition de nucléation de fissures et sur la détermination des contraintes dans les grains défavorablement orientés,
- une première application de la démarche développée au cas des chargements affines.

Le critère proposé permet en particulier de rendre compte du rôle important de la pression hydrostatique en fatigue polycyclique.

### Références

[1] Zhai, T. Martin, J.W. Briggs, G.A.D..

Fatigue damage in aluminium single crystal-I. on the surface containing the slip Burgers vector. Acta metall. mater.,

Vol. 43, No. 10, pp. 3813-3825, 1995.

# APPROCHE VARIATIONNELLE DE LA FATIGUE

***Jean-Jacques MARIGO***

*LMM-UPMC, 4 place Jussieu, case 162, 75252 PARIS Cedex 05*

*marigo@lmm.jussieu.fr*

L'objet de l'exposé est la présentation d'une approche dite variationnelle développée récemment pour modéliser la propagation de fissure par fatigue. Cette approche est basée sur des principes de minimisation d'énergie, avec des énergies de surface de type "forces cohésives" (l'énergie de surface dépend du saut des déplacements à travers les lèvres des fissures) dans lesquelles on tient compte de l'irréversibilité de l'ouverture des fissures. On a montré sur des exemples académiques, qu'on pouvait rendre compte effectivement ainsi des phénomènes de fatigue et qu'on retrouvait "à la limite", quand les dimensions de la structure sont grandes devant la longueur interne du matériau apparaissant dans l'énergie de surface, des lois "macroscopiques" de type Paris. En fait les lois obtenues sont plus riches que les lois de Paris utilisées habituellement, car elles contiennent comme cas particulier la loi de Griffith et qu'elles peuvent être utilisées pour des chargements d'amplitude variable, voire pour des surcharges. Ces lois déduites de la minimisation d'énergie dépendent à la fois de la structure, du matériau et du chargement. Elles s'obtiennent en combinant à la fois des approches globales et locales (approches qui sont contenues dans la minimisation de l'énergie).

# Le faïençage thermique et l'effet de pré-écrouissage en déformation et en contrainte contrôlées

*Said Taberi*

*LaMSID UMR EDF-CNRS 2832, 1 Av. Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex France*

Le faïençage thermique à grand nombre de cycles concerne les circuits de refroidissement à l'arrêt (RRA) en acier inoxydable des centrales nucléaires. Il se traduit par un réseau de fissures denses, peu profondes, unidirectionnelles ou multidirectionnelles.

Des résultats de mesures et de simulations de contraintes résiduelles de soudage montrent l'apparition de réseaux de faïençage dans les zones où la contrainte résiduelle de traction est maximale et son absence dans les zones de compression. Par contre on détecte des zones de faïençage sous une forte contrainte de compression résiduelle (-450 Mpa) due aux traitements de surface. Par ailleurs des résultats de tests uniaxiaux en contrainte contrôlée sur un acier 304L montrent un effet bénéfique de la contrainte moyenne de traction sur la durée de vie pour une éprouvette lisse ainsi qu'un effet bénéfique du sablage.

L'explication de ces résultats qui semblent a priori contradictoires repose sur l'existence pour des aciers austénitiques d'effet néfaste d'un pré-écrouissage en déformation contrôlée (fatigue thermique à grand nombre de cycles) et d'effet bénéfique en contrainte contrôlée :

*Effet du pré-écrouissage en déformation et en contrainte contrôlée* : Des essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes cylindriques en acier austénitique 304L et 316L ont montré qu'un pré-écrouissage cyclique (ou monotone) peut améliorer la durée de vie en contrainte imposée et la réduire en déformation imposée (même sous une contrainte de compression de -100 Mpa). Par contre on montre que pour un acier ferritique A42 l'effet du pré-écrouissage est négligeable sur la durée de vie, il n'y a donc pas de différenciation en contrainte et en déformation imposée.

L'explication repose sur la dépendance de la courbe cyclique en pré-écrouissage pour les aciers inoxydables. On montre que cette dépendance affecte la durée de vie de façon opposée en contrainte et en déformation contrôlée. Pour un acier A42 la dépendance de la courbe cyclique en pré-écrouissage est très faible.

*Simulation de l'effet du pré-écrouissage avec un modèle polycristallin* : L'analyse précédente est validée de façon qualitative par une simulation avec le modèle de comportement Polycristallin de l'ENSMC qui est mis au point pour décrire le phénomène de sur-écrouissage (calculs réalisés par le Code\_Aster).

*Application* : L'opération du *grenaillage* qui est généralement utilisée pour améliorer la durée de vie en fatigue, parce qu'elle crée une contrainte de compression à la surface, crée également un écrouissage important. Pour les aciers inoxydables sous déformation cyclique contrôlée, contrairement au cas de la contrainte contrôlée, cet écrouissage est pénalisant et peut annuler l'effet bénéfique de la contrainte de compression. Ainsi le grenaillage en fatigue thermique à grand nombre de cycle est pénalisant.

*Effet de la contrainte moyenne* : contrairement au cas des contraintes contrôlées, on montre un effet néfaste de la contrainte moyenne de traction en déformation contrôlée. Par ailleurs l'effet bénéfique de la contrainte moyenne de traction en contrainte contrôlée peut être expliqué par l'effet bénéfique sur l'amorçage d'un pré-écrouissage lié à la contrainte maximale, plus grand dans un essai avec contrainte moyenne que sans contrainte moyenne.

# Une approche probabiliste de la formation et de la propagation de réseaux de fissures en fatigue thermique

*N. Malésys<sup>1,2</sup>, L. Vincent<sup>2</sup>, F. Hild<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*LMT-Cachan, ENS Cachan / CNRS-UMR 8535 / Université Paris 6*

<sup>2</sup>*DEN/DMN/SRMA/LC2M, Commissariat à l'Energie Atomique de Saclay*

*malesys@lmt.ens-cachan.fr*

Mots-clé : faïençage thermique, processus point poissonien, zone d'obscurcissement, modèle de Weibull

Des réseaux de fissures de fatigue thermique ont été trouvés dans certains composants de circuits de refroidissement de réacteurs à l'arrêt, et, dans le cas de la centrale nucléaire de Civaux, une fissure débouchante a occasionné une fuite. Différentes approches sont développées afin de modéliser la formation et la propagation de réseaux de fissures en fatigue thermique. Nous proposons ici un modèle probabiliste basé principalement sur la prise en compte des zones d'obscurcissement. En effet, les fissures créées entraînent la présence de zones de relaxation des contraintes qui empêchent les sites d'amorçage (respectivement les fissures créées), présent(e)s dans ces zones, de créer de nouvelles fissures (resp. de continuer à se propager). Nous considérons une loi ponctuelle de Poisson pour modéliser la distribution des défauts (sites où peuvent s'initier les fissures), et une loi de Paris pour la propagation des fissures. L'initiation, la propagation et l'arrêt des fissures (mais aussi, la non-initiation d'une fissure) sont décrits à partir de ces deux hypothèses. Les conditions d'initiation des fissures sont définies en fonction de l'amplitude de contraintes et du nombre de cycles. Pour prendre en compte une initiation de fissures continue, un seuil de contrainte décroissant avec le nombre de cycles est utilisé. La taille des zones d'obscurcissement, fonction de la taille des fissures, est calculée à chaque cycle, ce qui permet de définir ensuite les densités de fissures actives et activées (Figure 1). La densité de fissures activées donne une information sur le nombre de fissures créées comparable directement avec les résultats de tests de fatigue thermique. La densité de fissures actives donne une information concernant les risques de perte d'intégrité de la structure. Le modèle a tout d'abord été étudié sous chargement 1D et est en cours d'adaptation pour un chargement 2D. Dans ce dernier cas, les fissures peuvent se propager suivant toutes les directions du plan. Le modèle se base donc sur une modération des tailles des zones d'obscurcissement en fonction de l'orientation relative des fissures.

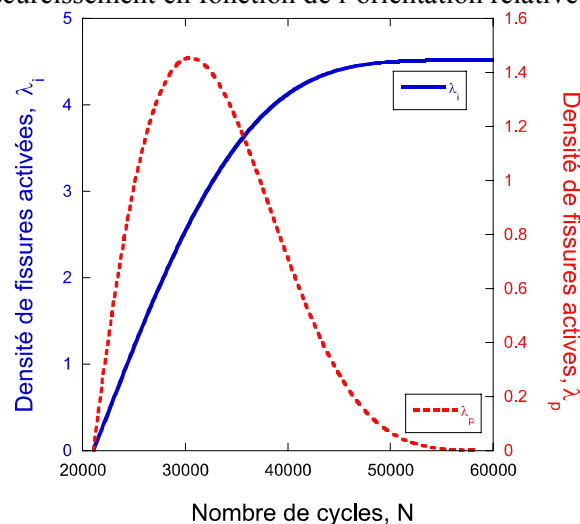


Figure 1 : Densités de fissures actives et activées en fonction du nombre de cycles

# Une approche probabiliste pour l'étude de la fatigue multiaxiale

**C. DOUDARD\*, S. CALLOCH\*\* et F. HILD\***

*\*LMT-Cachan, ENS de Cachan/CNRS-UMR 8535/Université Paris 6  
61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan Cedex*

*\*\*Laboratoire de Mécanique des Structures Navales, ENSIETA  
2 rue François Verny, F-29806 BREST Cedex 9*

mots clés: processus ponctuel de Poisson, modèle de Weibull, fatigue multiaxiale, microplasticité

Dans l'industrie, la rupture de pièces en service causée par la fatigue reste un problème majeur et courant. La difficulté à prévoir le comportement à la fatigue réside dans la nature de la sollicitation, qui est le plus souvent multiaxiale, et dans l'hétérogénéité des contraintes au sein des pièces en service. Le passage de l'éprouvette, où les sollicitations sont uniaxiales et les contraintes homogènes, à la structure reste mal maîtrisé. Néanmoins, depuis plusieurs années, des approches probabilistes ont montré qu'il était possible de rendre compte simplement (sans ajout de paramètre) de l'effet d'hétérogénéité des contraintes, mais aussi de l'effet de volume. Avec ces approches, la limite d'endurance moyenne dépend du volume effectif.

A partir d'observations microscopiques, il a été mis en évidence qu'en fatigue à grand nombre de cycles la microplasticité apparaît dans quelques grains, généralement ceux les mieux orientés (i.e., ceux qui ont une cisssion maximale) et que cette microplasticité est responsable de la ruine en fatigue. C'est à partir de ce constat que des approches multi-échelles ont été développées pour traiter des problèmes de fatigue. Elles sont généralement très efficaces pour des sollicitations uniaxiales, mais montrent le plus souvent des limites pour des sollicitations multiaxiales, notamment pour des trajets non proportionnels, à l'exception de quelques modèles comme celui de Papadopoulos *et al.*

La difficulté de l'étude de la multiaxialité réside dans le traitement des sollicitations non proportionnelles. En effet, au cours de celles-ci, plusieurs directions peuvent être activées, ce qui a pour conséquence d'augmenter la probabilité de ruine et de mettre en échec les approches classiques. On se propose de développer une approche multi-échelles probabiliste qui puisse rendre compte de cet effet. Il s'agit d'étendre la notion de volume effectif aux trajets multiaxiaux non proportionnels. Ainsi, comme pour le traitement du problème de l'hétérogénéité des contraintes, le fait d'avoir une approche probabiliste permettra de rendre compte du nombre de directions potentiellement activables. Pour cela on se place à l'échelle des plans de glissement et on considère que le seuil de plasticité est une variable aléatoire.

Cette présentation se décompose en trois parties. Tout d'abord, le modèle de description de la microplasticité au niveau d'un plan de glissement est mis en place. Ensuite une présentation générale du modèle est effectuée : on considère que le seuil plastique est une variable aléatoire et que tous les systèmes de glissement sont potentiellement activables (pas seulement la direction où la cisssion alternée est maximale). L'activation des sites (i.e., système de glissement) est décrite par un processus ponctuel de Poisson dont l'intensité (i.e., la densité de sites actifs) est une loi puissance en fonction de la cisssion alternée, mais afin de tenir compte de toutes les directions possibles, cette loi est intégrée suivant toutes les directions de glissement possible. Enfin le cas particulier de sollicitations de traction-torsion est présenté. Au cours de cette dernière partie, l'écriture du modèle est précisée, puis on confronte ce dernier à des résultats de la littérature après l'avoir identifié.

# Dispersion des contraintes dans les polycristaux et germination des fissures de fatigue à grand nombre de cycles

*M. Sauzay, Th. Jourdan*

CEA-Saclay, SRMA, Bât. 455, 91191 Gif-sur-Yvette, France, [sauzay@cea.fr](mailto:sauzay@cea.fr)

Nous présentons une évaluation numérique de l'effet de l'anisotropie élastique cristalline des métaux à symétrie cubique sur les contraintes dans les grains bien orientés (à la surface desquels s'initient les fissures de fatigue). Chacun de ces grains, d'orientation fixée, est supposé situé au centre d'un agrégat, à la surface d'un polycristal (concept du « mésoscope numérique » décrit dans [1]). Les orientations cristallines des autres grains sont aléatoires. De nombreux calculs par éléments finis sont effectués de manière à évaluer l'effet des grains voisins (méthode de Monte-Carlo). Les résultats sont exprimés en termes de moyennes, dispersions et histogrammes des contraintes de cisaillement sur les systèmes bien orientés et des contraintes normales correspondantes calculées dans les grains bien orientés. Nous avons étudié l'influence de nombreux paramètres : anisotropie du métal, conditions de chargement (traction-compression, cisaillement, traction équibiaxiale), orientation cristalline du grain pour lequel la dispersion est calculée, taille relative des grains, microplasticité... [2,3]. Dans des matériaux aussi répandus que le cuivre ou les aciers austénitiques, la moyenne de la contrainte de cisaillement est réduite (facteur de Schmid de 0.43 au lieu de 0.5 avec l'élasticité isotrope) et la dispersion relative est importante ( $\pm 22\%$  sur la contrainte de cisaillement et  $\pm 38\%$  sur la contrainte normale). Les fortes valeurs des dispersions calculées pour des chargements de faible amplitude sont en accord avec de nombreuses observations de la littérature qui mentionnent une forte variabilité des lignes de glissement [4,5], microstructures de dislocations [6] et nombres de cycles à initiation d'une fissure de fatigue d'un grain bien orienté à l'autre [7]. Elles sont discutées par rapport aux évaluations numériques de la littérature [8,9]. Enfin, la problématique plus générale de la dispersion des durées de vie en fatigue à grand nombre de cycles est évoquée.

[1] S. Héraud. Thèse, Ecole Polytechnique, 1998.

[2] M. Sauzay, Th. Jourdan. Dispersion des champs mécaniques locaux et de la germination des fissures de fatigue à grand nombre de cycles. CFM, Troyes, 2005.

[3] M. Sauzay, Th. Jourdan. Elasticité cristalline et influence des grains voisins sur les champs locaux. CFM, Troyes, 2005.

[4] C. Blochwitz, J. Brechbühl, W. Tirschler. Analysis of activated slip systems in fatigued nickel polycrystals using the EBSD-technique in the scanning electron microscope. *Materials Science Engineering*, A210:42-47, 1996.

[5] J. Man, K. Obrtlík, C. Blochwitz, J. Polak. Atomic force microscopy of surface relief in individual grains of fatigued 316L austenitic stainless steel. *Acta Materialia*, 50:3767-3780, 2002.

[6] H. Mughrabi, R. Wang. Cyclic stress-strain response and high-cycle fatigue behaviour of copper polycrystals. In P. Lukas and J. Polak (eds.) *Basic mechanisms in fatigue of metals*. Elsevier. Amsterdam, 1988.

[7] M. Mineur. Conditions locales d'amorçage des fissures de fatigue dans un acier inoxydable de type 316L : aspects cristallographiques (EBSD). Thèse, Université de Poitiers, 2000.

[8] S. Pommier. 'Arching' effect in elastic polycrystals: implications for the variability of fatigue lives. *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, 25:331-348, 2002.

[9] R. A. Lebensohn, Y. Liu, P. Ponte Castaneda. On the accuracy of the self-consistent approximation for polycrystals: comparison with full-field numerical simulations. *Acta Materialia*, 52:5347-5361, 2004.



# Prise en compte de la géométrie des défauts de surface dans un critère d'endurance multiaxial

*Yves Nadot, Thomas Billaudeau et Hicham Gadouini*

*Laboratoire de Mécanique et de Physique des Matériaux, ENSMA, CNRS UMR 6617*

Des défauts artificiels de géométrie contrôlée sont introduits à la surface d'éprouvettes de fatigue pour évaluer quels paramètres liés aux défauts contrôlent la limite de fatigue en traction et en torsion. Les résultats montrent que lorsque le défaut est doux (faible concentration de contrainte) la géométrie du défaut influence la limite de fatigue à taille constante. Par contre lorsque le défaut est une entaille très aiguë, alors la limite de fatigue est contrôlée par la taille du défaut. L'observation des mécanismes en pointe de défaut montre que le stade I de fissuration ne peut être négligé même en présence d'une entaille, ceci étant appuyé par la caractérisation de l'état de contrainte autour de chaque défaut. Nous proposons d'introduire le paramètre défaut par le biais du gradient des contraintes dans un critère d'endurance multiaxial. Une validation effectuée sur un acier type C36 ainsi qu'une fonte GS donne de bons résultats. Il est alors possible de déterminer en tout point d'un composant la taille de défaut admissible.

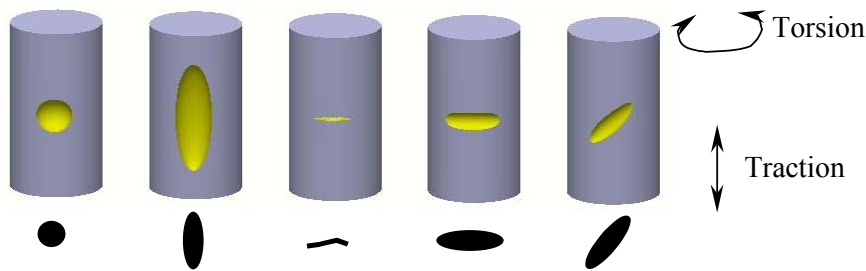


Figure 1. Géométrie des défauts artificiels introduits

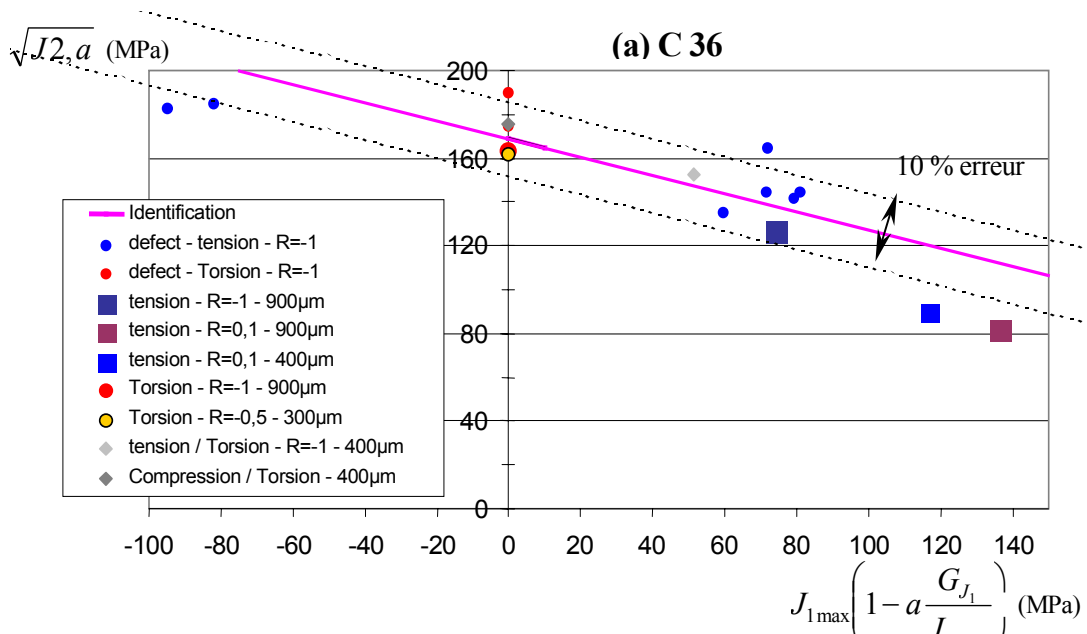


Figure 2. Validation du critère proposé pour un acier C36