

Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI

(Document provisoire)

Spécialité : Mécanique

Présenté par :

Amine SBITTI

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris VI

Propagation des fissures 2D et 3D planes sous chargement thermomécanique à amplitudes variables

Soutenance prévue le 17 décembre 2009 devant le jury composé de :

Mme H. DUMONTET	Professeur, PARIS VII	Examinatrice
M. H. MAITOURNAM	Professeur, LMS Ecole Polytechnique	Rapporteur
M. D. HALM	Professeur, (LMPM - ENSMA Poitiers)	Rapporteur
M. Eric CHARKALUK	HDR, C.N.R.S. (LML Lille)	Examineur
M. J – J MARIGO	Professeur, LMS, Ecole Polytechnique	Directeur de thèse
M. S. TAHERI	HDR, EDF R&D – LaMSID	Co-Directeur de thèse
Mme T. M - L NGUEN	Dr, SNCF	Examinatrice
M. J – P SERMAGE	Dr, EDF – DPN	Invité
M. J. LAVERNE	Dr, EDF R&D	Invité

Un incident sur un circuit de refroidissement de réacteur à l'arrêt de centrale nucléaire est à l'origine des travaux de la présente étude. Lors de cet incident, une fissure a été détectée sur un cordon de soudure d'un coude du circuit de refroidissement et a conduit à des expertises révélant la présence de réseaux de fissures dues à de la fatigue thermique dans la partie incriminée, à savoir dans une zone de mélange entre fluides de refroidissement chaud froid. Des études ont été lancées dans de nombreux domaines afin de mieux comprendre la formation et la propagation de ces réseaux. Cette thèse s'est inscrite dans ce programme de recherche et s'est proposée d'étudier la propagation des fissures 2D et 3D sous un chargement thermomécanique à amplitudes et fréquences variables.

Dans un premier temps, une analyse bibliographique de la fatigue thermique dans de nombreux domaines industriels a été réalisée. Dans les circuits de refroidissement à l'arrêt des centrales nucléaires, le faïençage thermique à grand nombre de cycles se traduit par un réseau de fissures denses, peu profondes, unidirectionnelles ou multidirectionnelles.

Étant donné que le faïençage thermique est un phénomène de fatigue à grand nombre de cycles et l'amorçage des fissures en surface n'est pas simultané, on explique le faïençage thermique dans les circuits RRA par l'arrêt (ou le fort ralentissement) de la propagation lié à la décroissance du facteur d'intensité des contraintes. En effet, les fluctuations thermiques de hautes fréquences induisent un gradient décroissant des contraintes dans l'épaisseur. Cela a pour conséquence une décroissance des facteurs d'intensité de contraintes en profondeur. Un intérêt particulier est donc porté à l'étude de la propagation et l'arrêt d'une fissure isolée.

L'étude paramétrique dans le cas d'un chargement thermique sinusoïdal à amplitude constante nous a permis de déterminer le domaine des paramètres du chargement thermique (coefficient d'échange, amplitude de température et fréquence) pour lequel une fissure s'arrête à 2.5mm de profondeur et d'en tirer des indications sur le nombre de cycles à l'amorçage. Qualitativement, on déduit que lorsque les contraintes moyennes de traction sont faibles, la modélisation de l'amorçage des circuits RRA en fatigue thermique doit être prise dans un modèle élasto – plastique. En revanche, la présence des contraintes moyennes très élevées favorise le choix d'un modèle élastique pour l'amorçage.

Nous avons réalisé des calculs éléments finis (modèle 2D – axisymétrique) sur un tube afin de simuler la propagation de fissure dans la maquette FATHER.. Le but de ces simulations est de vérifier si une séquence thermo – hydraulique de 10 secondes répétée peut être représentative de la totalité du chargement. Cela s'avère valable uniquement dans le cas où la loi de Paris ne tiendrait pas compte du seuil de non propagation.

La comparaison des simulations 2D (fissure circonférentielle axisymétrique) et 3D (fissure circonférentielle semi – elliptique) sur la même configuration géométrique a montré que le modèle 2D surestime le temps de propagation et permet d'avoir une marge de sécurité pour la prévision de durée de vie.

Les simulations numériques n'ont pas permis d'expliquer la profondeur de fissure maximale (0.9mm) dans la maquette FATHER après 300 heures de chargement. Le temps de propagation (entre 0.8 et 0.9mm) calculé par la simulation numérique est de l'ordre de 100 jours. Cette durée est calculée par la loi de Paris avec seuil et une contrainte moyenne de 500MPa. Deux raisons peuvent être à l'origine de cette différence, la première est liée à la valeur exacte du seuil de non propagation, en effet, une petite erreur sur cette valeur modifie fortement la durée de propagation. La deuxième raison en est que les fissures de profondeur

0.9mm évoluent dans le domaine des fissures courtes où le seuil n'intervient pas dans la vitesse de propagation.

Nous avons mis au point dans le code éléments fins Code –Aster une méthodologie pour simuler la propagation des fissures 3D (semi – elliptique) et 2D sous chargement thermomécanique à amplitudes et fréquences variables. L'idée de base est de piloter l'avancé de fissure par des incréments de longueur et non pas cycle par cycle puis de remailler après chaque pas de propagation.. En chaque point du front de fissure, la propagation est régie par la loi de Paris 2D. Cette méthodologie permet de calculer la propagation pour des millions de cycles.

La méthode X-FEM nous a permis de simuler la propagation des fissures 3D avec un front libre. La comparaison avec la méthode de remaillage a montré que sous un chargement mécanique de traction l'hypothèse d'un front semi – elliptique est valable, alors que sous un chargement thermomécanique, la géométrie du fond de fissure s'écarte d'une ellipse. Ceci est dû probablement au gradient de contraintes dans l'épaisseur.

L'avantage de la méthode X-FEM est de pouvoir faire un calcul de propagation avec un maillage unique. Comme ce maillage doit être fin dans une zone assez étendue, il est généralement plus gros que celui produit par remaillage avec une fissure donnée. Par conséquent, la résolution du problème mécanique nécessite un peu plus de temps avec X-FEM qu'avec FEM (facteur 5 ici), ce qui est en partie compensé par le temps nécessaire au remaillage à chaque itération. La méthode X-FEM n'impose aucune condition sur l'évolution de la géométrie du fond. Elle est donc plus générique que la méthode par remaillage utilisée ici.

L'étude paramétrique pour l'arrêt d'une fissure semi – elliptique circonférentielle à 2.5mm sous un chargement thermique sinusoïdal a montré que les fissures arrêtées à cette profondeur sont très allongées, le rapport (profondeur/extension circonférentielle) est petit. Par ailleurs, le modèle 2D – axisymétrique surestime l'amplitude de la température pour laquelle une fissure s'arrête à 2.5mm. Toutefois l'écart par rapport au modèle 3D diminue lorsque les fréquences d'arrêt augmentent, les modèles 2D et 3D convergent au même résultat. D'autre part, l'avancée des fissures semi-elliptiques sous chargement thermique avec un seuil de non – propagation identique en surface et en profondeur conduit la fissure vers une position d'équilibre « *iso – K* » avec des rapports a/c qui dépendent de la fréquence du chargement. La position d'équilibre correspond à l'arrêt simultané de la propagation de fissure en surface et en profondeur et elle est indépendante de la taille initiale

A partir de modèles Monte – Carlo développés par Kamaya [KAMA 08] on a pu montrer que la morphologie de la fissuration en fatigue dépend de la bi – axialité du chargement. Un chargement equi – biaxial conduit à l'apparition à des réseaux de fissures orthogonales. Dans le cas contraire on obtient de la multi – fissuration avec des fissures et parallèles.

Nous avons montré à travers des simulations 3D qu'un réseau de fissures de petite taille réduit les facteurs d'intensité de contraintes en profondeur. Cependant, pour un chargement de basse fréquence, les fissures sont très profondes même dans un réseau de petite taille. L'arrêt du réseau de fissure de fatigue est attribué au gradient décroissant des contraintes dans l'épaisseur. Les réseaux de fissures de petites tailles réduisent l'amplitude des contraintes

surfaiques et contribuent à la saturation du réseau en empêchant l'amorçage de nouvelles fissures en surface.

A partir du modèle de forces cohésives, nous avons simulé la propagation et la coalescence de deux fissures orthogonales initialement semi – elliptiques dans un réseau de faïençage thermique. Il en résulte que la propagation très forte en surface provoque la coalescence des fissures. Au cours de la propagation, le front de fissure tend vers une position d'équilibre qui est celle d'un front rectiligne. La propagation devient uniforme le long du front de fissure. D'autre part, la simulation de la propagation de deux fissures orthogonales de tailles initiales différentes, montre qu'il n'y a pas d'effet d'écran et que la fissure peut s'arrêter à cause de la contrainte normale qui devient inférieure à la contrainte critique σ_c .

Nous avons étendu l'approche variationnelle de la fatigue développée par JAUBERT et MARIGO [JAUB 06] aux cycles d'amplitudes variables. A partir d'un exemple "académique" – le décollement d'un film mince inextensible et parfaitement flexible – on a construit des lois de fatigue limite pour des blocs de cycles à amplitudes variables. Lorsque la longueur caractéristique ε tend vers 0, on obtient un système d'équations reliant les taux de restitution d'énergie des différentes amplitudes à la vitesse d'avancée de fissure $\dot{l} = f(G_1, G_2, \dots)$. De plus, lorsque l'on considère de faibles valeurs des taux de restitution d'énergie, on trouve des lois puissance de type Paris classique de la forme $\frac{dl}{dN} = C_1 G_1^m + C_2 G_2^m + \dots$. Il s'avère que les amplitudes variables ne modifient pas l'exposant de la loi de Paris. Les effets des cycles à amplitudes variables sur la vitesse de propagation pris en compte dans les constantes C_1 et C_2 . Par ailleurs, l'ordre des cycles dans une séquence n'a aucun effet sur la vitesse de propagation (pour les faibles valeurs de G). On peut donc conclure qu'il n'y a pas d'effet de séquence avec ce modèle. Cependant, il faut vérifier si c'est toujours vrai dans le cas d'un problème 2D en présence de la plasticité (voir [LAVE 09]).