

## Benchmark sur le calcul du facteur d'intensité de contraintes en dynamique.

M. Hajjaj, S. Bugat (EDF R&D, Dépt MMC),  
G. Debruyne (EDF R&D, Dépt AMA), T. Yuritzinn (CEA DEN).

Dans le cadre du projet « Cuve 60 ans », le département MMC est engagé dans une action visant à valider et améliorer l'application et la codification de l'arrêt de fissure, dans des analyses de sûreté visant la tenue des cuves pressurisées aux chocs thermiques.

En complément des études de nocivité des défauts réalisées en termes d'amorçage (via le paramètre KIC, pour la rupture fragile), le concept d'arrêt de fissure caractérisé par la ténacité à l'arrêt  $K_{Ia}$ , peut-être utilisé comme une seconde barrière de sûreté. Ainsi en cas d'incident ou d'accident (APRP : Accident par Perte de Réfrigérant Primaire, par exemple), une fissure qui s'amorcerait dans l'épaisseur de la cuve pourrait s'arrêter au bout d'une distance considérée comme non critique.

L'objectif de cette étude est de déterminer à l'aide d'un essai de choc thermique sur disque les valeurs de  $K_{Ia}$  pour un acier de cuve bainitique 18MND5 et de préciser l'importance des effets dynamiques sur l'arrêt de fissure. Compte tenu de la vitesse de propagation du défaut lors de l'essai (700 m/s), il est nécessaire de calculer le FIC en dynamique.

### L'essai de choc thermique sur disque

L'essai choisi par EDF pour étudier l'arrêt de fissure est l'essai de choc thermique sur disque.

Il a été développé au Centre des Matériaux de l'Ecole de Mines de Paris [1]. Cet essai consiste à utiliser un disque cylindrique percé en son

centre contenant une fissure initiale en surface externe. L'éprouvette est plongée dans un bain d'azote liquide à la température de  $-196^{\circ}\text{C}$ . Une fois la température stabilisée, la surface interne du disque est chauffée à l'aide d'un inducteur. Le gradient thermique ainsi engendré crée des contraintes de traction sur la surface externe du disque conduisant à l'amorçage du défaut, et des contraintes de compression en face interne, qui associées à l'élévation de la ténacité du matériau, tendent à arrêter la fissure.

### Problème de Broberg

Dans le cadre d'une fiche coopérative avec le CEA et d'un partenariat avec le laboratoire MSSMAT de l'école Centrale Paris, une comparaison sur les différents codes de calcul (*Code\_Aster*, CASTEM et ABAQUS) de la simulation de la propagation et de l'arrêt de fissure a été réalisée.

Le problème de référence qui a été choisi pour cette comparaison est le problème de Broberg [2].

Broberg s'est intéressé au cas d'une fissure apparaissant à  $t = 0$  s, et se propageant à vitesse constante  $V$  dans un milieu infini, élastique isotrope, et soumis à une contrainte d'ouverture  $\sigma_0$  (figure 1).

Le maillage utilisé (figure 1) correspond à un quart de plaque de 100 m de côté. Le calcul est effectué en déformations planes. La fissure se propage de 1 à 10 m. La taille de maille en pointe de défaut est de 250 mm.

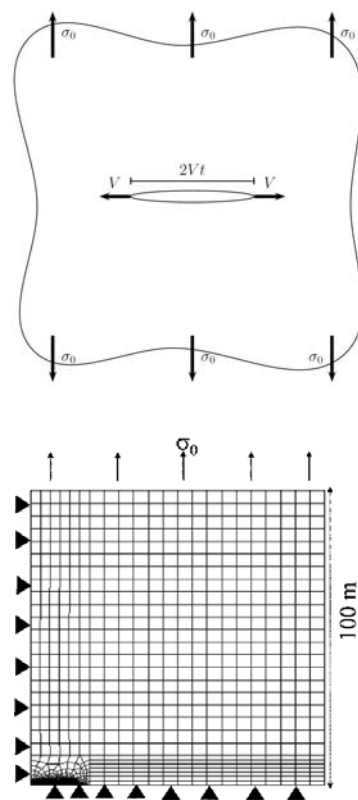
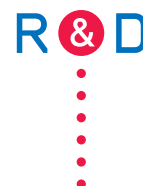


Figure 1 : Schéma du problème de Broberg et maillage



## Benchmark sur le calcul du facteur d'intensité de contraintes en dynamique.

M. Hajjaj, S. Bugat (EDF R&D, Dépt MMC),  
G. Debruyne (EDF R&D, Dépt AMA), T. Yuritzinn (CEA DEN).

Le chargement correspond à une force de 10000 MN, appliquée uniformément sur la face supérieure de la plaque, afin d'obtenir une pression répartie de 100 MPa (la plaque ayant une épaisseur de 1 m). Pour simuler la propagation de la fissure, la méthode de relâchement des nœuds a été utilisée. Pour cette étude deux vitesses de fissure ont été étudiées :  $V = 500 \text{ m.s}^{-1}$  et  $V = 1500 \text{ m.s}^{-1}$ .

Le FIC en dynamique a été calculé via le champ de déplacement en pointe de fissure. En dynamique, dans le cas d'une fissure se propageant en mode I en déformations planes dans un milieu infini, on peut définir un facteur d'intensité des déplacements par analogie avec le cas statique via la formule :

$$K_{Iu} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{E}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{x}} u_y(x)$$

l'axe x désignant la direction de propagation de la fissure, et  $u_y$ , le déplacement normal au plan de fissure.

Le passage du facteur d'intensité des déplacements au facteur d'intensité des contraintes en dynamique se fait alors par la relation :

$$\frac{K_I^{dyn}}{K_{Iu}} = \frac{D(1-\nu)}{\alpha_u(1-\alpha_s^2)}$$

Les paramètres  $D$ ,  $\alpha_d$  et  $\alpha_s$  sont des fonctions de la vitesse instantanée de propagation de la fissure,  $V$ , et des célérités des ondes de dilatation et de cisaillement :

$$\alpha_d = \sqrt{1 - V^2 / c_d^2}$$

$$\alpha_s = \sqrt{1 - V^2 / c_s^2}$$

$$D = 4 \alpha_d \alpha_s - (1 + \alpha_s^2)^2$$

$$c_d = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

La figure 2 donne le rapport du FIC dynamique et du FIC statique en fonction de la position de la pointe de fissure pour les vitesses  $V = 500 \text{ m.s}^{-1}$  et  $V = 1500 \text{ m.s}^{-1}$ .

Les résultats montrent un bon accord entre les codes de calculs (Code\_Aster et CASTEM).

On note en outre un meilleur accord pour les vitesses élevées ( $V = 1500 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Compte tenu des bons résultats entre

les codes de calcul, le benchmark a été poursuivi par l'analyse de l'essai de choc thermique sur disque. Les résultats ont également montré un bon accord entre les différents codes et ont permis de mettre en évidence la faible influence des effets dynamiques sur cet essai [3].

[1] Genty A. : Etude expérimentale et numérique de l'amorçage et de l'arrêt de fissure, sous choc thermique, dans un acier faiblement allié (16MND5) Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1989.

[2] Bugat S. : Cahier des charges pour l'intercomparaison «Simulation élastodynamique de l'essai de choc thermique sur disque». Note HT-26/03/031/A, Novembre 2003. EDF-R&D/RNE/MMC.

[3] Hajjaj M., Berdin C. : Propagation et arrêt de fissure dans les cuves REP Rapport d'avancement n°2 - Note HT-26/04/014/A, Juillet 2004. EDF-R&D/RNE/MMC. ■

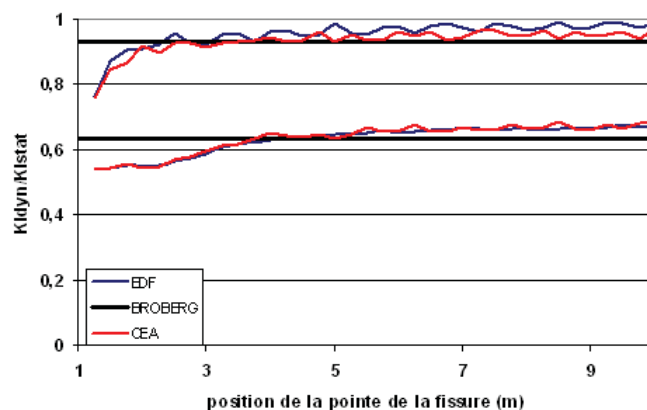


Figure 2 : Résultats du problème de Broberg