

L'approche énergétique en mécanique de la rupture.

Y. Mézière (EDF DPI Septen), Y. Wadier (EDF R&D AMA)

Bases théoriques

La théorie de Francfort et Marigo, basée sur un principe de minimisation de l'énergie, généralise la théorie de Griffith puisqu'elle permet de prévoir l'initiation et la propagation brutale de fissures. Elle a été étendue à la plasticité pour laquelle on peut définir un taux de restitution d'énergie, appelé G_p . La minimisation de l'énergie est équivalente à la maximisation de ce paramètre.



Figure 1 : Schéma de l'entaille

La méthodologie employée consiste alors à modéliser le défaut sous forme d'une entaille (Figure 1). Le fond d'entaille est un demi-cercle (Γ) de rayon R , et la zone de propagation potentielle du défaut est appelée Z_e . L'identification de l'instant d'initiation se fait par maximisation du taux d'énergie élastique dans cette zone. On détermine à chaque instant de calcul l'évolution de la quantité G_p définie par :

$$G_p = \max_{\Delta l} \left[\left(\int_{Z_e} (w_e \cdot ds) \right) / \Delta l \right]$$

où « w_e » est l'énergie élastique dans la zone « Z_e » de longueur Δl . L'instant d'amorçage est celui où G_p atteint la valeur critique G_{pC} [1].

Sur le plan numérique, il s'agit de réaliser un post-traitement d'un calcul éléments finis donnant accès aux valeurs de l'énergie élastique pour

différentes valeurs de Δl , distance considérée par rapport au fond initial d'entaille. La seule contrainte est de modéliser la fissure par une entaille et de mailler finement la zone Z_e sur une distance suffisamment grande pour pouvoir trouver le maximum. La réalisation d'une étude passe par une première phase d'identification de la valeur critique G_{pC} , connaissant la ténacité du matériau J_C . Il est donc nécessaire de faire un calcul de simulation d'un essai de traction sur une éprouvette CT et de calculer G -théta afin d'identifier l'instant critique, puis G_{pC} . Ensuite on peut passer à la seconde phase de prédiction de l'amorçage sur la structure considérée.

Mise en œuvre dans Code_Aster

Elle nécessite la réalisation des 3 étapes suivantes :

1/ Maillage de la structure fissurée avec modélisation de la fissure par une entaille. Cette entaille est définie par des paramètres géométriques suivants : R , rayon du fond d'entaille ; Δl -max, distance de propagation maximum de l'entaille ; E , épaisseur d'un « copeau » ou distance minimale de propagation de l'entaille.

2/ Calcul mécanique avec introduction d'un champ théta via `CALC_THETA` et calcul de G -théta via `CALC_G_THETA`. Ces deux opérations s'effectuent de façon classique comme pour une vraie fissure. Seule restriction : le rayon minimum des couronnes considérées doit être supérieur au rayon de l'entaille.

3/ Calcul du paramètre G_p . Il fait essentiellement appel à la commande `POST_ELEM` qui permet de calculer l'énergie élastique aux points de Gauss des éléments appartenant à la zone Z_e . On peut alors accéder à la valeur discrétisée de l'énergie élastique dans la zone Z_e de longueur Δl , puis en chercher le maximum par rapport à Δl , qui fournit la valeur recherchée de G_p .

Actuellement toutes ces étapes sont illustrées dans un cas test (SSNP131) qui peut servir de modèle à l'utilisateur. Le calcul de G_p y est traité en PYTHON et va faire prochainement l'objet du développement d'une macro-commande.

Exemple d'application industrielle

La tenue en service de la cuve constitue un élément essentiel de la démonstration de sûreté des réacteurs à eau sous pression. Dès la conception, toutes les dispositions doivent être prises pour garantir cette tenue pendant toute la durée d'exploitation.

En particulier, le non amorçage d'un défaut générique doit être démontré. Les chargements pris en compte, classés selon leur probabilité d'occurrence, sont principalement des chocs froids pressurisés qui ont pour conséquence de mettre les éventuels défauts sous revêtement en mode d'ouverture avec en général une phase de mise en charge suivie d'une phase de décharge.

L'approche énergétique en mécanique de la rupture.

Y. Mézière (EDF DPI Septen), Y. Wadier (EDF R&D AMA)

Or, les approches classiques, basées sur la méthode G-théta, ne sont pas valides en décharge, sauf à supposer un comportement irréaliste du matériau (élasticité non linéaire). Dans le domaine du clivage la méthode énergétique ouvre donc une porte, car l'aptitude du paramètre G_P à être un paramètre de rupture, en charge ou en décharge, a été démontrée dans de nombreuses études de R&D : projets européens VOCALIST (sur l'effet « petit défaut ») et SMILE (sur l'effet de préchargement à chaud), projet EDF « Cuve-60 ans », etc. Nous présentons ici une application industrielle de l'approche.

Nous avons considéré un cas simple : une virole de cuve modélisée en 2D axisymétrique (Figure 2). Le maillage de la zone de propagation de l'entaille est similaire à celui de l'éprouvette CT de référence qui sert à

l'identification de G_{PC} . Les données utilisées (matériaux, lois de comportement, transitoires) sont rigoureusement celles utilisées pour la définition de la correction de plasticité de l'approche simplifiée du dossier cuve. Les transitoires pris en compte sont la petite brèche primaire 3 pouces (3ème catégorie), le LOCA et la RTV (4ème catégorie).

Afin d'établir des comparaisons, nous avons considéré d'autres approches (G-théta, G_P/G_{TP}). Dans le cas des transitoires « petite brèche » et « LOCA » les résultats obtenus via G_P sont proches de ceux obtenus via les autres paramètres et confortent l'approche simplifiée. Dans le cas du chargement « RTV » les résultats obtenus via G_P indiquent un léger excès de conservatisme de l'approche simplifiée. L'approche énergétique

donne donc des résultats cohérents avec ceux de l'approche dossier (pas de remise en cause des résultats antérieurs) et pourrait permettre dans certains cas, de gagner des marges.

[1] E. Lorentz, Y. Wadier : «L'approche énergétique de la rupture élastoplastique appliquée à la modélisation de la propagation d'une entaille», REEF, Volume 13, n° 5, 6, 7 / 2004. ■

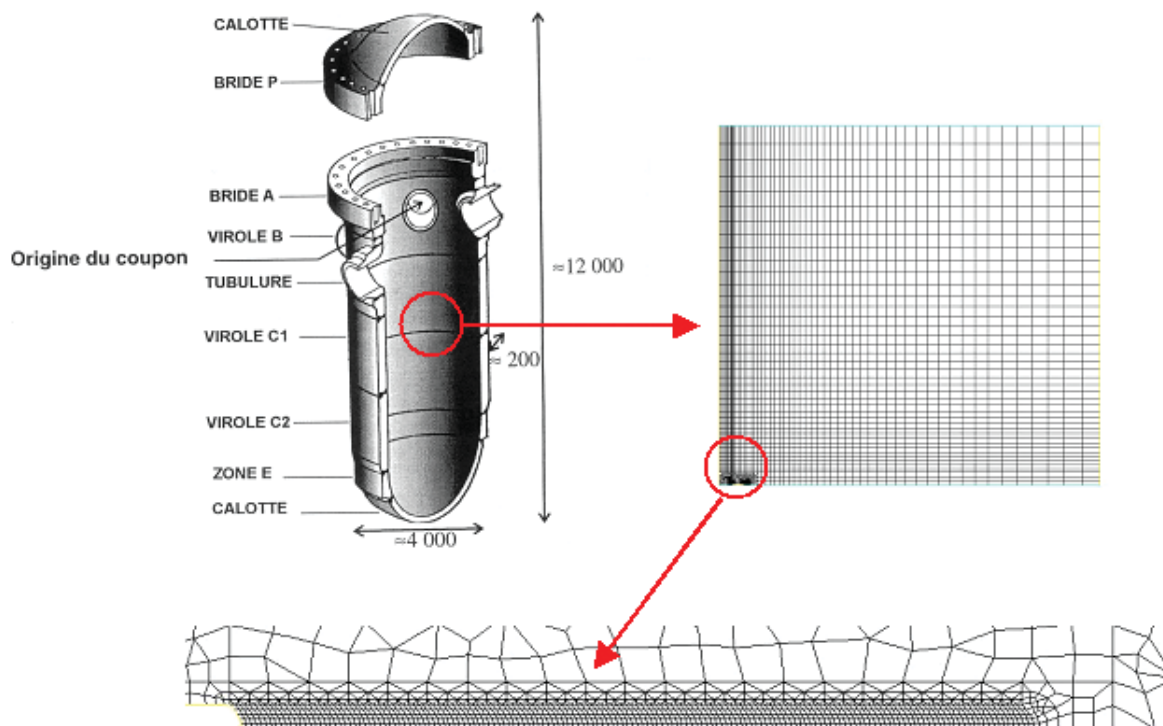


Figure 2 : Schéma d'une cuve REP
Maillage de la zone étudiée - zoom sur la zone du fond d'entaille