

Simulation de la fissuration des briques de graphite pour les réacteurs AGR

L. Pellet (EDF / R&D / UK Centre) ; S. Geniaut (EDF / R&D / AMA)

Contexte et objectifs

Les briques de graphite composant le cœur des réacteurs AGRs (Advanced Gas Cooled Reactors) exploités par EDF Energy Nuclear Generation au Royaume Uni sont des composants critiques pour la durée de vie de ces centrales. Au cours de l'exploitation des réacteurs, ces briques sont soumises à une combinaison de chargements internes et externes. Les contraintes internes dues à l'évolution du matériau avec la température, l'irradiation et l'oxydation sont susceptibles de devenir suffisamment importantes tard dans la vie du réacteur pour être à l'origine de fissures initiées à l'angle des encoches présentes sur la partie extérieure des briques. La géométrie générale des briques est présentée sur la Figure 1. Ces briques de graphite ne pouvant pas être remplacées, il est primordial pour EDF Energy de mieux appréhender ce phénomène afin de déterminer le seuil de fissuration acceptable et les conséquences associées

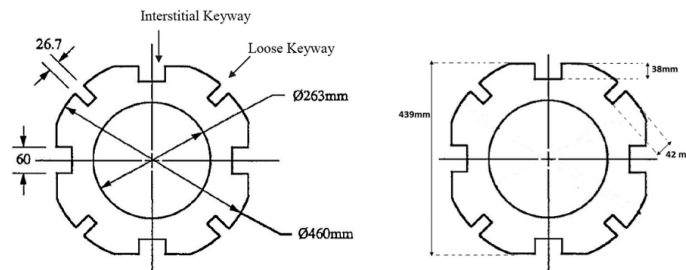


Figure 1 : Géométrie générale des briques.

EDF Energy NG a lancé sur ce sujet un programme de recherche important. Parmi les projets lancés, des travaux sont réalisés par EDF Energy R&D UK Centre et EDF R&D dans le cadre du Modelling and Simulation Centre, centre commun entre EDF et l'Université de Manchester sur la modélisation en mécanique. L'objectif du projet est de simuler la propagation de ces fissures afin d'évaluer le trajet de fissuration et la tenue résiduelle des briques fissurées.

Benchmark sur la propagation de fissure en fragile

Parmi les nombreux essais expérimentaux de propagation de fissure dans les briques de graphite dont dispose EDF Energy, il a été choisi d'en retenir 3 significatifs afin de

comparer les méthodes disponibles pour simuler la propagation des fissures dans les briques de graphite. La configuration n°1 simule par un chargement externe l'effet mécanique engendré par l'évolution du matériau sur la brique. Grâce au dispositif expérimental, la paroi interne de la brique est en compression et la paroi externe de la brique est en traction. Une fissure s'initie dans un angle d'une encoche et se propage en traversant la brique de part en part, pour déboucher en paroi interne. Le trajet de fissuration est quasi-rectiligne et identique quelle que soit la section considérée de la brique. La configuration n°2 simule expérimentalement l'effet d'un mouvement relatif des briques les unes par rapport aux autres. Le dispositif expérimental de la configuration n°3 permet de générer des trajets de fissuration hors-plan (uniquement modélisable en 3D).

Simulation de la fissuration du graphite par une approche classique de mécanique de la rupture

La fissure n'est pas maillée et est représentée par la méthode X-FEM. Le graphite est un matériau fragile. On utilise ici la théorie de Griffith : une fissure se propage si G , le maximum du taux d'énergie dissipée par l'ouverture de la fissure dépasse un seuil critique G_c . En 3D, on considère qu'un point du fond de fissure se propage si $G > 0,75G_c$. On utilise l'outil de raffinement de maillage Homard disponible dans *Salome-Meca* : à chaque pas de propagation, le maillage est raffiné en fond de fissure afin d'améliorer le calcul de G , déraffiné ailleurs. La direction de propagation de la fissure est celle pour laquelle la contrainte de cisaillement est maximale. La longueur d'avancée de la fissure par pas de propagation est fixée par l'utilisateur.

Simulation de la fissuration des briques de graphite pour les réacteurs AGR

L. Pellet (EDF / R&D / UK Centre) ; S. Geniaut (EDF / R&D / AMA)

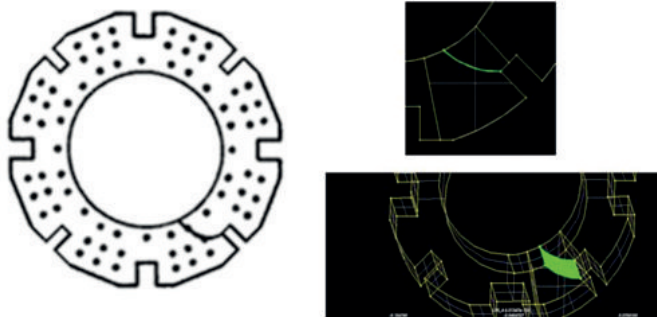


Figure 2 : Trajet de fissuration expérimentale et résultats de simulations en 2D et 3D pour la configuration n°2.

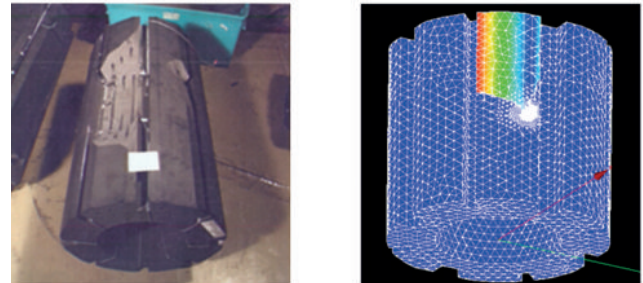


Figure 3 : Configuration 3: Résultat expérimental et trajet obtenu numériquement (sur une demi-brique).

Les résultats correspondants à la configuration 1 et à la configuration 2 sont très proches des résultats expérimentaux (Figure 2). Pour la configuration 3, la fissure se propage d'abord d'une encoche vers l'autre comme expérimentalement (Figure 3). Des difficultés numériques sont rencontrées lorsque la fissure atteint l'encoche adjacente et commence à remonter vers la surface. Ces difficultés sont liées à un manque de robustesse du calcul de G aux extrémités du front de fissure et au voisinage d'une surface libre. Des travaux ont été récemment effectués par EDF R&D sur ce sujet et les calculs seront effectués à nouveau afin d'évaluer si ces évolutions permettent d'aller plus loin dans la simulation.

Simulation de la fissuration du graphite par un modèle d'endommagement

Pour traiter la problématique de la fissuration de matériaux quasi-fragiles (comme le béton), un modèle d'endommagement a été récemment développé à EDF R&D. Il s'agit d'un modèle d'endommagement isotrope scalaire (ENDO_SCALAIRE), régularisée par un gradient d'endommagement (GRAD_VARI) afin d'éviter les problèmes bien connus de localisation. La forme particulière de la fonction de rigidité le rend très robuste. Dans sa version la plus récente, il intègre une dissymétrie traction/compression. Dans ce modèle, la largeur de la bande

d'endommagement maximal est un paramètre matériaux (noté 2D). D'un point de vue numérique, il convient de respecter certaines conditions entre cette largeur et la taille des mailles. Le chargement est piloté par un contrôle de l'incrément d'endommagement (PRED_ELAS).

Les résultats relatifs à la configuration n°1 montrent que l'endommagement s'initie dans un angle d'une encoche et traverse le ligament, conformément aux résultats expérimentaux. Quand à la configuration n°2, l'évolution de l'endommagement est représentée en 4 instants ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) sur la Figure 4. Conformément aux observations expérimentales, l'endommagement s'initie dans un angle de l'encoche chargé et traverse le ligament en suivant un trajet de fissuration non rectiligne.

La mise en place de ce modèle d'endommagement pour le benchmark a été relativement rapide et aisée, du moins pour les modélisations 2D. En effet en 3D, l'utilisation de l'adaptation de maillage sera nécessaire pour conserver des temps de calcul raisonnables, ce qui rendra la mise en œuvre plus complexe.

Perspectives

Ces travaux seront poursuivis en 2013 et 2014. Le benchmark sera étendu à d'autres méthodes. La ou les méthodes retenues seront testées sur d'autres cas de validation et/ou cas industriels. Elles seront utilisées afin de déterminer les trajets de fissuration et le comportement mécanique des briques fissurées. Elles seront transférées à l'ingénierie d'EDF Energy NG et ses sous-traitants.

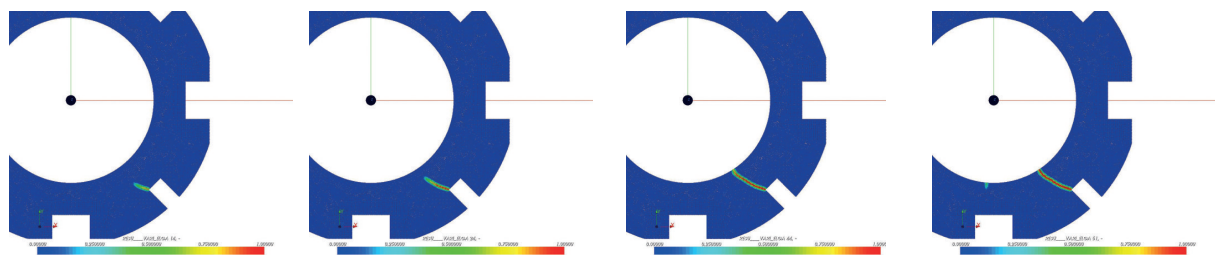


Figure 4 : Évolution de l'endommagement pour 4 instants ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) – configuration n°2.