

Propagation de fissures tridimensionnelles dans des matériaux inélastiques avec XFEM dans Cast3m

B. Prabel¹, T. Yuritzinn¹, T. Charras¹, A. Simatos^{1,2}

¹ CEA, DEN, DM2S, SEMT, F-91191 Gif-sur-Yvette, France. {benoit.prabel,tamarra.yuritzinn,thierry.charras}@cea.fr

² LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, F69621, France. {anita.simatos}@insa-lyon.fr

Résumé — L'objet de cette communication est de présenter les méthodes numériques développées dans le code éléments finis Cast3m pour la modélisation de propagation de fissure tridimensionnelle dans des matériaux inélastiques en statique et dynamique via la méthode des éléments finis étendus (XFEM). En particulier la stratégie de représentation de la fissure et la bonne prédiction du trajet de fissure en fonction du critère utilisé seront mis en avant et illustrées par des exemples variés.

Mots clés — XFEM, propagation de fissure 3D, mécanique de la rupture non linéaire.

1 Méthodes numériques

La méthode des éléments finis étendus (XFEM) semble être une voie prometteuse pour la modélisation de propagation de fissure, car elle ne suppose pas le trajet de fissure a priori, elle introduit la discontinuité de manière maîtrisée, et elle ne nécessite pas de remaillage. Ses avantages sur les méthodes concurrentes sont pourtant nuancés par quelques difficultés que la communauté scientifique lève progressivement. On peut *notamment* citer et discuter des difficultés suivantes :

- l'intégration élémentaire complexe due à la présence de fonctions non-polynomiales,
- la présence d'une zone de transition qui limite le taux de convergence en maillage,
- la mise à jour de la géométrie de la fissure difficile lors de brusques changements topologiques,
- l'adaptation des critères de rupture.

S'il existe des méthodes numériques (basées sur des transformations) permettant de résoudre de la première difficulté sus-citée, celles-ci ne sont pas adaptées au cas non-linéaire matériau, puisque la position des points d'intégration change au cours du temps. Pour éviter des projections de champ dans des zones justement à fort gradient, le choix a été fait d'utiliser une répartition dense et prédéfinie de points de Gauss dans les éléments susceptibles d'être enrichis [1]. Un compromis entre les deux méthodes devrait être possible dans un futur proche, mais ce n'est pas l'objet de cette communication.

La seconde difficulté, secondaire d'un point de vue pratique, n'est pas discutée ici. Seules les deux dernières et la manière dont elles sont résolues dans Cast3m, sont abordées dans cette communication.

Représentation explicite/implicite de fissure. Pour représenter la fissure, l'utilisation d'une base locale du front de fissure s'est très rapidement imposée via l'utilisation d'un couple (ψ, ϕ) de fonctions de niveaux (ou "Level set") généralement supportée par les fonctions de forme standards (1).

$$\psi = \sum_i N_i(\mathbf{x}) \psi_i \quad \phi = \sum_i N_i(\mathbf{x}) \phi_i \quad (1)$$

Cette représentation implicite d'interface comporte certains avantages, mais son actualisation avec la propagation, bien que traitée en 3D par Gravouil et al. [2], reste difficile notamment dans le cas de bifurcation brutale du trajet de fissure. Certains aménagements numériques (utilisation d'une grille auxiliaire [1], raffinement multigrille) minimisent ces difficultés, mais elles subsistent.

C'est pourquoi, Cast3m utilise une représentation explicite de la fissure. Celle-ci est maillée de manière indépendante du maillage de la structure comme le montre la figure 1a. Cette stratégie est également employée par Pereira et al [3]. Des relations géométriques simples permettent de construire rapidement la base locale (ψ, ϕ) . Ainsi, l'actualisation de la base locale suite à une propagation de fissure est simple

et directe (pas de schéma itératif comme pour les level set). Le nouveau front de fissure est déduit du précédent par une translation Δa résultat direct du critère de propagation.

Par ailleurs, le maillage de la fissure constitue ainsi le support d'un modèle local, à une échelle plus fine que celle de la structure, permettant de prendre en compte des phénomènes tels que la déchirure ductile via un modèle cohésif (travaux de Simatos [4]), ou le contact frottant (Pierrès et al. [5]).

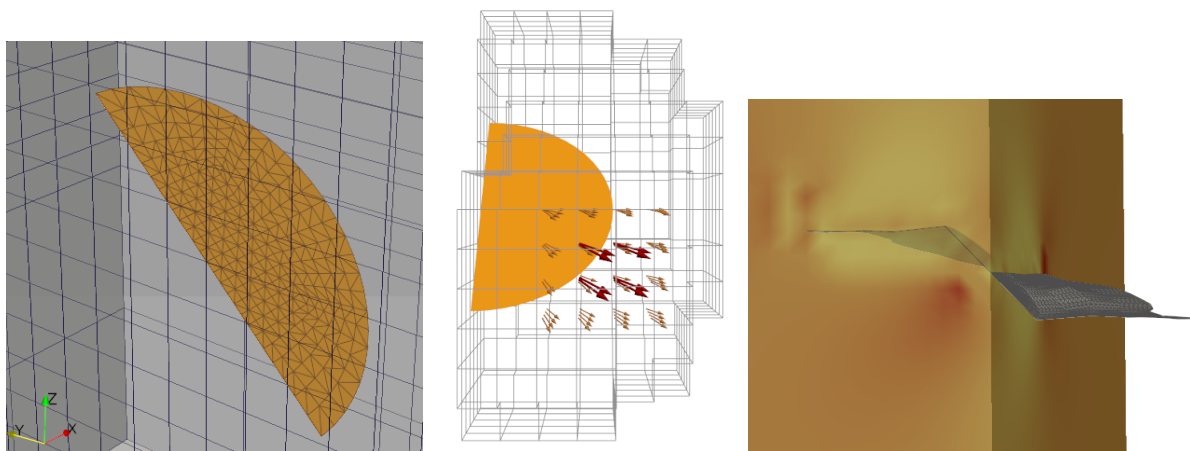


FIG. 1 – a : Maillage de la fissure indépendant inclus dans celui de la structure. b : Exemple de champ d'avancé virtuel θ_j et éléments environnants. c : Propagation 3D par fatigue (coupe de la structure).

Calcul des critères de rupture. La méthode $G\theta$ implantée dans Cast3m pour le calcul des l'intégrale J en élasticité et en plasticité et des facteurs d'intensité des contraintes K_I , K_{II} , (et K_{III} en 3D) est adaptée aux éléments XFEM. La différence avec les éléments finis standards concerne la définition du champ d'avancé virtuelle θ .

La méthode classiquement utilisée dans la littérature consiste à définir un domaine d'intégration parallélépipédique autour du front de fissure. Cette approche a l'inconvénient d'introduire une projection des champs mécaniques qui ne permet plus de vérifier exactement les équations d'équilibre de compatibilité et de comportement, car les gradients évoluent rapidement à proximité du front de fissure.

Dans Cast3m, on construit plutôt un champ θ supporté par le maillage de la structure et discrétisant au mieux une avancé virtuelle de chaque point du front. Pour cela, on associe un champ θ_j d'avancé élémentaire à chaque élément EF_j contenant un point du front (cf. figure 1b). Un nombre de couches permet de définir une zone plus ou moins large dans laquelle le champ θ_j ne sera pas nul.

2 Applications

Les applications visées sont aussi large que celles rencontrées dans l'industrie nucléaire. Des exemples de propagation 3D par fatigue en mode mixte (figure 1c), ainsi que de propagation dynamique dans un matériau élasto-viscoplastique sont traités avec XFEM dans Cast3m.

Références

- [1] B. Prabel, A. Combescure, A. Gravouil, S. Marie. *Level set X-FEM non-matching meshes : application to dynamic crack propagation in elastic-plastic media*, IJNME, vol.69, 1553-1569, 2007.
- [2] A. Gravouil, N. Moës, T. Belytschko. *Non-planar 3D crack growth by the extended finite element and level sets Part II : Level set update*, IJNME, vol.53, 2569-2586, 2002.
- [3] JP. Pereira, CA. Duarte, X. Jiao. *Three-dimensional crack growth with hp-generalized finite element and face offsetting methods*, Computational Mechanics, vol.46, 431-453, 2010.
- [4] A. Simatos, S. Marie, A. Combescure, F. Cazes. *Modelling ductile tearing from diffuse plasticity to crack propagation*, Pressure Vessels and Piping conference, Bellevue 2010.
- [5] E. Pierrès, MC. Baietto-Dubourg, A. Gravouil. *Fissuration 3D X-FEM avec contact interfacial : stratégie à deux échelles structure/interface*, Colloque national en calcul des structures, Giens 2009.