



HAL
open science

Propagation 3D de fissures cohésives X-FEM

Patrick Massin, Guilhem Ferté, Nicolas Moes

► **To cite this version:**

Patrick Massin, Guilhem Ferté, Nicolas Moes. Propagation 3D de fissures cohésives X-FEM. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01516463

HAL Id: hal-01516463

<https://hal.science/hal-01516463v1>

Submitted on 1 May 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Propagation 3D de fissures cohésives X-FEM

P. Massin¹, G. ferté^{1,2}, N. Moës²

¹ EDF R&D, LaMSID, UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 8193, {patrick.massin, guilhem.ferte}@edf.fr

² GeM, Ecole Centrale Nantes, {nicolas.moes}@ec-nantes.fr

Résumé — Une stratégie innovante d'étude quasi-statique de problèmes de propagation de fissures a été proposée dans Code_Aster, couplant des modèles de zones cohésives et la méthode des éléments finis étendus (XFEM). Elle a été validée sur des benchmarks issus de la littérature, pour la plupart des expériences réalisées sur des éprouvettes de béton. La capacité de la méthode à prédire des trajets de fissurations complexes pour des problèmes tridimensionnels a ainsi été illustrée. Une extension à la dynamique a été réalisée et validée pour les trajets de fissurations droits, les premiers résultats sur trajets courbes étant prometteurs.

Mots clés — X-FEM, propagation 3D, cohésif, quasi-statique, dynamique.

1. Introduction

Afin d'évaluer la nocivité de défauts détectés dans certaines de ces centrales, EDF est amené à utiliser des outils de simulation avancés dont Code_Aster. Les phénomènes visés sont la propagation de fissures 3D sur trajet inconnu, mais aussi les transitoires dynamiques durant les phases de propagation instables en rupture fragile.

On propose à cet effet d'associer la méthode des éléments finis étendus (XFEM) [1] et les modèles de zones cohésives [2,3,4]. Celles-ci sont définies sur des surfaces potentielles de fissuration étendues. Ainsi, la loi cohésive séparera naturellement les domaines adhérents et ouverts. Une actualisation implicite du front de propagation peut donc être menée, ce qui fait l'originalité de cette méthode. Ceci demande une insertion robuste de lois d'interface non-régulières dans la XFEM. En statique, l'utilisation d'espaces de multiplicateurs de Lagrange dédiés dans une formulation consistante, des opérateurs diagonaux par blocs à l'interface et une écriture de la loi cohésive dans le formalisme du lagrangien augmenté permettent d'y parvenir. A partir de là, et avec un critère directionnel écrit sur les champs cohésifs uniquement, une procédure de propagation sur trajet inconnu est proposée et confrontée à des résultats expérimentaux de la littérature. En dynamique, une loi cohésive initialement adhérente est traitée implicitement au sein d'un schéma originellement explicite, ce qui permet une détermination analytique des contraintes cohésives si une discrétisation appropriée est adoptée. La formulation est validée sur un essai de type éprouvette DCB conique et une application de ces méthodes sur des études industrielles est proposée.

2. Propagation quasi-statique avec éléments cohésifs x-fem

Dans la plupart des stratégies mettant en œuvre des éléments cohésifs, l'avancée de la zone cohésive est donnée par un critère explicite, qui se base sur le champ de contraintes en amont du front. Nous proposons une procédure alternative, dans laquelle la loi cohésive est définie sur une large zone potentielle de fissuration. L'avancée du front de fissure se fait de façon implicite, par un post-traitement du résultat cohésif. On laisse ainsi l'équilibre décider naturellement de la frontière entre zones adhérentes et ouvertes.

Ceci demande une insertion robuste de lois d'interface non-régulières dans la XFEM. Dans ce but, nous illustrons par une série d'exemples numériques qu'une loi avec rigidité initiale finie $t_c([\mathbf{u}])$ échoue à décrire ces larges zones d'adhérence dans X-FEM. Si le paramètre de pénalisation est trop faible, la solution est fautive: on observe une ouverture significative dans les zones censées être adhérentes. S'il est trop important, on observe des oscillations d'origine numérique dues à la non-conformité de l'interface par rapport au maillage. Pour pallier le problème, nous proposons:

- l'introduction d'un espace de multiplicateurs de Lagrange λ dédié à X-FEM [5,6], et une formulation de type « mortier » pour utiliser cet espace de façon consistante;
- l'écriture de la loi cohésive avec rigidité initiale infinie $t_c([\mathbf{u}]; \lambda)$ dans le formalisme du Lagrangien augmenté;
- une diagonalisation de certains opérateurs d'interface.

Sur un test d'arrachement, nous montrons que chacune de ces modifications permet, en plus de résoudre le problème d'oscillations numériques, de gagner en robustesse, en diminuant le nombre d'itérations de Newton nécessaires pour résoudre le problème.

En se basant sur cette capacité à résoudre de façon exacte la zone cohésive en introduisant une loi sur une large surface potentielle, la procédure d'étude de propagation sur trajet inconnu se décompose comme suit :

- étant donnée une surface potentielle de fissuration, on calcule l'équilibre de la structure,
- on actualise le front de propagation par un post-traitement des grandeurs cohésives du calcul,
- on détermine les angles de propagation le long du front,
- on actualise la zone potentielle de fissuration en fonction,
- on prépare l'espace de multiplicateurs et les variables internes initiales pour le nouveau pas de propagation.

Un premier front de propagation brut est déterminé en déterminant l'iso-zéro de la variable interne de la loi cohésive, et en calculant l'intersection de cet iso-zéro avec les faces du maillage. A partir de ce nuage de points, on reconstruit a posteriori l'avancée de fissure qu'il aurait fallu appliquer depuis l'ancien front pour propager jusqu'à cet endroit. On lisse cette fonction d'avancée le long du front, puis un algorithme d'actualisation des level-sets est appliqué, ce qui produit un nouveau front plus régulier.

En ce qui concerne la détermination de l'angle de propagation, on se base sur le critère de contrainte circonférentielle maximale d'Erdogan et Sih [7], traduit en termes de facteurs d'intensité des contraintes. En présence d'une zone cohésive, on peut prouver que les champs loins de la zone cohésive ont la même allure que des champs d'une fissure libre, et définir des facteurs d'intensité des contraintes équivalents. Nous montrons que ces facteurs d'intensité des contraintes équivalents peuvent être déduits directement du saut de déplacement et de la contrainte cohésive par des intégrales sur l'interface.

L'actualisation de la surface potentielle de fissuration se fait par une méthode géométrique d'actualisation des level-sets [8].

La procédure proposée est validée à l'aide de trois tests issus de la littérature. Le premier consiste en l'étude de la fissuration d'une éprouvette de béton en forme d'équerre, issue de [9]. Les résultats obtenus montrent un bon accord avec l'expérience, tant en terme de trajet de fissuration que de courbe force-déplacement. Le résultat obtenu pour cette dernière pourrait cependant être amélioré en utilisant une loi exponentielle plutôt qu'une loi linéaire ou bilinéaire. Le second test est un test de flexion trois points sur une éprouvette de Plexiglas avec une pré-fissure inclinée par rapport à l'axe d'application du chargement. Pour ce test, seul le trajet de fissuration est comparé avec les expériences, et montre une bonne correspondance qualitative. Le troisième test est un test de torsion d'un parallélépipède de béton entaillé sur la diagonale (voir figure 1). Le trajet de fissuration est complexe, et exhibe une forme en S. La comparaison est satisfaisante tant du point de vue du trajet de fissuration que de la réponse globale de la structure, avec la même remarque que précédemment pour cette dernière.

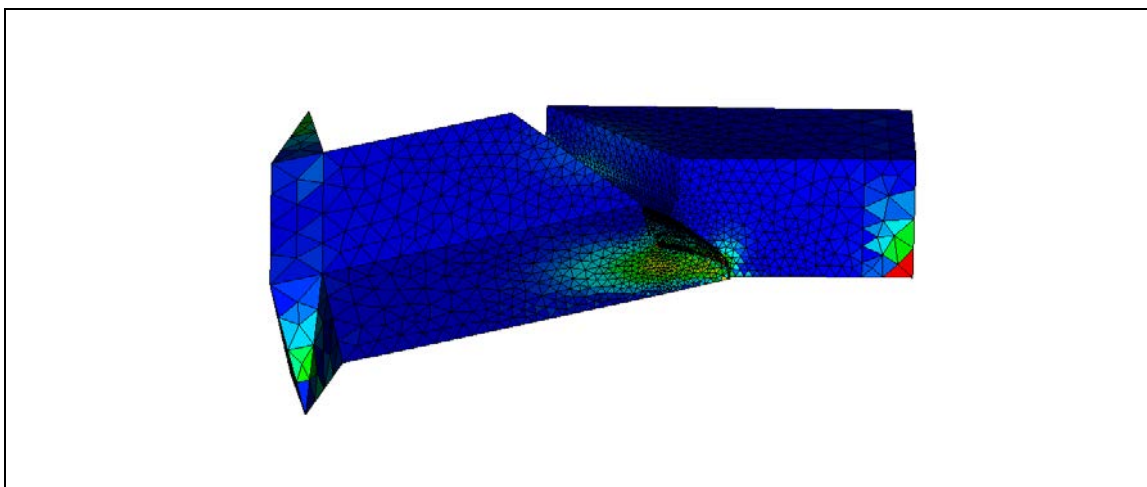


Figure 1 – Prédiction d'un trajet de fissuration complexe pour un essai de torsion d'une éprouvette de béton.

3. Propagation dynamique avec éléments cohésifs x-fem

Par analogie avec la propagation en quasi-statique, nous cherchons à avoir une formulation qui permette l'introduction de la loi cohésive sur une large surface de fissuration potentielle: cette formulation doit pouvoir décrire correctement de larges zones adhérentes et une transition marquée avec la zone ouverte.

Dans ce but, nous considérons une loi initialement rigide, qui est introduite de façon implicite dans le schéma des différences centrées. Cette méthode a été proposée par Doyen [10] pour des interfaces conformes au maillage; nous en proposons une extension à X-FEM. En utilisant alors un espace dédié pour discrétiser la contrainte cohésive - qui n'est autre que l'espace de multiplicateurs introduit précédemment - et en diagonalisant certains opérateurs d'interface, on parvient à ramener la détermination de la contrainte cohésive à la résolution analytique d'une série d'équations scalaires.

L'implémentation est validée sur un test de type DCB trapézoïdale. Dans ce test, une fissure s'amorce et se propage brutalement avant de s'arrêter dans la structure: la longueur d'arrêt est la quantité d'intérêt. En réalisant, comme d'usage en dynamique explicite, le calcul avec différentes valeurs du pas de temps, on observe des résultats sensiblement similaires. On en déduit que la méthode présente des propriétés énergétiques acceptables, quoique perfectibles, et permet d'évaluer correctement la distance d'arrêt. La détermination de la charge critique déclenchant la propagation

instable se fait par une méthode de pilotage du chargement proposée par Lorentz [11], qui est utilisée dans le cadre XFEM. Il s'agit d'une méthode permettant de suivre des instabilités lors d'un calcul quasi-statique, en déterminant l'intensité du chargement comme une nouvelle inconnue du problème, et en prescrivant une ouverture maximale comme une nouvelle équation. En d'autres termes, on prescrit une certaine dissipation maximale, et on en déduit l'intensité de chargement qui la produit.

En perspective, la procédure d'étude de propagation sur trajet inconnu du paragraphe précédent est adaptée pour la dynamique. Tandis que les premiers résultats pour décrire une propagation instable sont encourageants, la méthodologie semble plus difficilement utilisable pour décrire les chargements transitoires (chocs): le front apparaît moins marqué (zone d'élaboration diffuse) ce qui rend plus difficile son actualisation. Par ailleurs, la taille de la zone cohésive ne peut plus être estimée à priori comme en quasi-statique, ce qui peut compliquer le choix des bons paramètres de calcul.

4. Références bibliographiques

- [1] N. Moës, J. Dolbow, T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng*, Volume 46, 135-150, 1999.
- [2] E. Lorentz. A mixed interface finite element for cohesive zone models. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, pages 317-320, 2008.
- [3] G. Wells and L. Sluys. A new method for modelling cohesive cracks using finite elements. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 50:2667-2682, 2001.
- [4] J. Mergheim, E. Kuhl, and P. Steinmann. A finite element method for the computational modelling of cohesive cracks. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 63:276-289, 2005.
- [5] N. Moës, E. Béchet, and M. Tourbier. Imposing dirichlet boundary conditions in the extended finite element method. *Int. J. Num. Meth. Engng*, 67:1641-1669, 2006.
- [6] S. Géniaut, P. Massin, and N. Moës. A stable 3d contact formulation for cracks using x-fem. *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, 75:259-276, 2007.
- [7] F. Erdogan and G.C. Sih. On the crack extension in plane loading and transverse shear. *Journal Basic Engng.*, 85:519-527, 1963.
- [8] D. Colombo. An implicit geometrical approach to level-set update for 3d non-planar x-fem crack propagation. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 240:39-50, 2012.
- [9] B.J. Wrinkler. Traglastuntersuchungen von unbewehrten und bewehrten Betonstrukturen auf der Grundlage eines objectiven Werkstoffgesetzes für Beton. PhD thesis, Universität Innsbruck, 2001.
- [10] D. Doyen, A. Ern, and S. Piperno. Quasi-explicit time-integration schemes for dynamic fracture with set-valued cohesive zone models. *Computational Mechanics*, 52:401-416, 2013.
- [11] E. Lorentz and P. Badel. A new path-following constraint for strain-softening finite element simulations. *International journal for numerical methods in engineering*, 60:499-526, 2004.