

Transition endommagement diffus vers fissuration par introduction d'une bande cohésive dans X-FEM

J. Wolf¹, J-P. Crété², P. Longère¹, J-M. Cadou³

¹ICA, ISAE-SUPAERO Toulouse, France, patrice.longere@isae.fr

²Laboratoire Quartz, SUPMECA Saint-Ouen, France, jean-philippe.crete@supmeca.fr

³IRD, UBS Lorient, France, jean-marc.cadou@univ-ubs.fr

Résumé — Dans les matériaux ductiles, la rupture résulte d'un processus de dégradation en 3 étapes : endommagement diffus, localisation de l'endommagement dans une bande, et fissuration. Le travail présenté vise à reproduire dans une approche unifiée ces étapes dans le cadre de la méthode des éléments finis étendus (X-FEM). La phase intermédiaire de localisation est reproduite par insertion d'une bande cohésive dans le formalisme X-FEM et des critères de transition sont développés. L'approche est implantée en tant qu'UEL dans le code Abaqus et des simulations 2D sont menées.

Mots clefs — Endommagement ductile, localisation, fissuration, bande cohésive, X-FEM.

1. Introduction

Le projet porte sur la prédiction numérique de la résistance résiduelle de grandes structures constituées de matériaux ductiles vis-à-vis d'évènements accidentels, tels que ceux rencontrés p.ex. dans le cas de la collision de navires ou d'impact d'oiseaux en aéronautique. Ces évènements peuvent dans certains cas conduire à la ruine complète de la structure.

La difficulté consiste alors à reproduire dans une méthodologie unifiée basée sur la méthode des éléments finis les étapes successives de dégradation progressive de la structure, à savoir (i) l'endommagement diffus par croissance de cavités, (ii) la localisation de la déformation induite par la coalescence des cavités, et (iii) la fissuration. Un élément essentiel pour la conception d'un modèle de fissuration ductile prédictif est le traitement numérique de cette phase transitoire critique de localisation de la déformation dans une bande de matière étroite.

L'utilisation durant tout le processus de dégradation jusqu'à rupture d'un modèle continu d'endommagement couplé à la plasticité, associé à une méthode de suppression ou d'érosion des éléments finis, est connue pour donner des résultats numériques fortement dépendants du maillage dans le régime adoucissant. Pour résoudre ce problème dans une approche unifiée, Feld-Payet et al [1] proposent d'utiliser une stratégie de remaillage dans le cadre d'un comportement élasto-plastique-endommageable où l'endommagement est piloté par une variable non-locale. Les auteurs traitent alors des problèmes complexes tels que l'initiation et la propagation de fissure dans des cas 2D et 3D. Cependant, l'emploi de techniques de remaillage, outre le fait qu'il soit particulièrement coûteux en temps de calcul, nécessite de faire des approximations pour la projection des champs des variables internes dépendantes du trajet et de l'histoire du chargement.

Il peut donc s'avérer plus judicieux et plus économique de modifier la formulation des éléments finis pour rendre compte des effets cinématiques des discontinuités induites par la fissure. Parmi les approches dédiées existantes, on peut notamment citer la E-FEM [2] et la X-FEM [3]. L'approche TLS proposée par Moes et al [4] est une méthode d'endommagement non-local, basée sur l'utilisation de level-set et qui permet un passage naturel vers la méthode X-FEM [5]. Celle-ci a été appliquée avec succès dans de nombreux cas d'études et notamment 3D [6].

Dans ce papier, l'accent est mis sur l'étape intermédiaire de localisation de la déformation induite par l'endommagement ductile par le biais d'une approche cohésive couplée avec la X-FEM [7]. Conformément aux observations expérimentales qui montrent que la bande peut être vue comme une méso-fissure cohésive, la bande de localisation est considérée ici comme une forte discontinuité cohésive. La progressive perte de cohésion de la bande conduit à la formation de l'authentique forte discontinuité induite par la fissure (voir Figure 1).

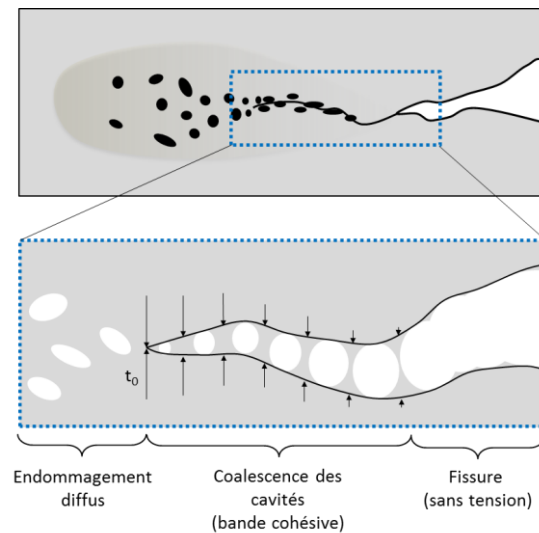


Figure 1 – Principe de la discontinuité forte cohésive

2. Comportement et représentation

2.1. Comportement du matériau

L'endommagement du matériau résulte de la création, de la croissance et de la coalescence de cavités. Afin de reproduire ce processus d'endommagement ductile, le comportement du matériau est décrit via un modèle de type Gurson [8] [9] modifié, dont le potentiel de plasticité-endommagement s'écrit :

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(-\frac{3p_m + p_r}{2\sigma_y} \right) - (1 + (q_1 f)^2) = 0 \quad (1)$$

où σ_{eq} désigne la contrainte équivalente au sens de Mises, p_m la pression, σ_y la contrainte d'écoulement, f la fraction volumique des cavités, q_1 une constante du modèle (égale à 1 ici) et p_r une variable permettant de traduire la croissance de l'endommagement par cisaillement [10]. Le potentiel de Gurson retenu est illustré sur la Figure 2.

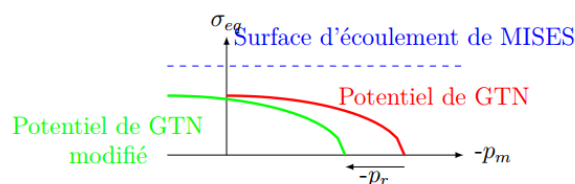


Figure 2 – Surface de charge de Mises, de GTN et de GTN modifié

2.2. Représentation de la fissure

La représentation de la fissure est faite dans le formalisme de la méthode des éléments finis étendus (X-FEM) avec base décalée. Les conséquences cinématiques de la fissure sont décrites par un champ de déplacement décrivant la discontinuité forte induite par la présence de fissure dans l'élément fini :

$$u(x) = \sum_{i \in I} N_i a_i + \sum_{j \in J} N_j b_j (H(x) - H_j) \quad (2)$$

La première partie de l'équation (2) correspond au champ de déplacement régulier et la seconde partie au champ discontinu. Les variables a_i et b_j représentent respectivement les degrés de liberté classiques et discontinus. N_i représente les fonctions d'interpolation et H est la fonction de Heaviside généralisée.

2.3. Représentation de la bande cohésive

La cohésion de la bande est assurée par un effort de traction-cisaillement qui s'oppose à l'ouverture de la fissure, i.e. aux efforts induits par la présence des degrés de liberté d'enrichissement. Une loi de cohésion linéairement décroissante est adoptée ici (voir Figure 3).

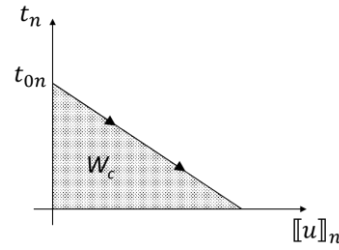


Figure 3 – Loi cohésive linéairement décroissante

Dans une première approche, on suppose un découplage des termes de la loi cohésive (voir équation 3) et on impose une rigidité identique pour la composante en traction et celle en cisaillement ($K_{nn} = K_{mm}$) :

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 \\ 0 & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [[u]]_n \\ [[u]]_m \end{Bmatrix} \quad (3)$$

où \vec{t} est le vecteur contrainte de la bande cohésive. Les variables $[[u]]_n$ et $[[u]]_m$ représentent respectivement le saut de déplacement normal et tangentiel de la fissure.

2.4. Critères

Pour décrire le passage entre les 3 étapes de dégradation progressive du matériau évoquées en introduction (endommagement diffus \rightarrow localisation \rightarrow fissuration), deux critères sont nécessaires : un premier critère activant la bande de localisation et un second critère activant la fissure. Dès lors que la zone cohésive apparaît (activation de la bande de localisation) au sein d'un élément fini, celle-ci dissipe de l'énergie. De plus, étant donné que nous nous intéressons uniquement au cas de chargements monotones en traction, la fermeture de la zone cohésive n'est pas traitée dans l'approche proposée ici.

2.4.1 Transition endommagement diffus vers localisation dans la bande cohésive

Dans une première approche, l'activation de la bande de localisation est provisoirement conditionnée par l'atteinte d'une porosité critique. L'orientation de la bande de localisation est déterminée par le biais d'une analyse de bifurcation (voir équation 4).

$$\det(\vec{n}^t \cdot \bar{L} \cdot \vec{n}) \leq 0 \quad (4)$$

\bar{L} est l'opérateur tangent et \vec{n} représente la normale à la bande de localisation (voir Figure 4).

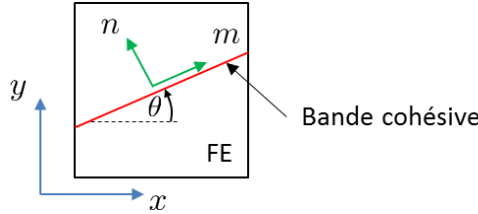


Figure 4 – Orientation de la bande cohésive

2.4.2 Transition localisation dans la bande cohésive vers fissuration

Dans une première approche, le relâchement total des efforts de cohésion est supposé s'activer pour une valeur critique de traction/cisaillement de la loi cohésive. La méthodologie adoptée pour l'approche unifiée développée ici est synthétisée en Figure 5.

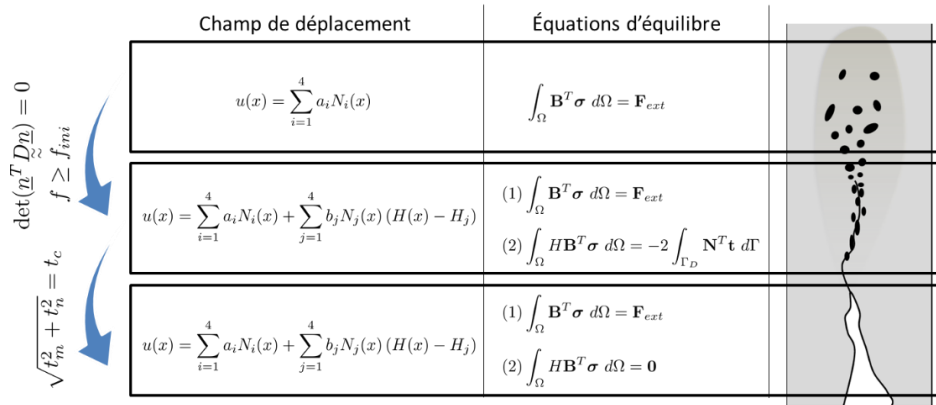


Figure 5 – Méthodologie adoptée pour l'approche unifiée

2.5. Intégration numérique

Dans une première approche, afin de réaliser les intégrations spatiales, 4 points d'intégration (fixes au cours du calcul) sont utilisés. Pour garantir qu'au moins un point soit de part et d'autre de la fissure, cette dernière est forcée à passer par le milieu des côtés des éléments qu'elle traverse (voir Figure 6). Cette méthode, bien qu'entraînant des erreurs dans l'évaluation des différentes quantités intégrables, permet de réduire fortement le temps de calcul par rapport à l'utilisation de 64 points d'intégration (comme proposé par Elguedj et al [11]). Une amélioration de la méthode d'intégration sera d'utiliser l'approche proposée par Martin et al [12].

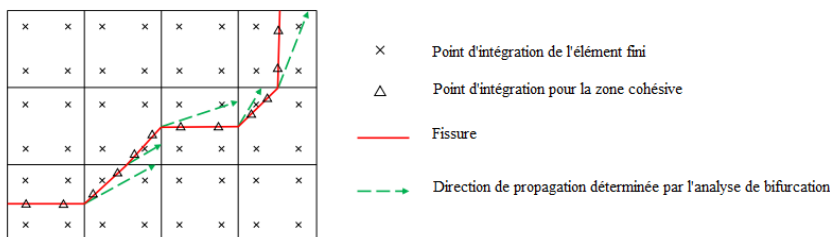


Figure 6 – Algorithme de propagation

3. Application à la traction d'une plaque

L'approche synthétisée dans le chapitre 2 est implantée dans un élément fini utilisateur (UEL) du code commercial par éléments finis Abaqus.

3.1. Configuration étudiée

Des simulations numériques sont réalisées sur une éprouvette plate soumise à un chargement de traction simple (voir Figure 6) avec des maillages grossiers et fins.

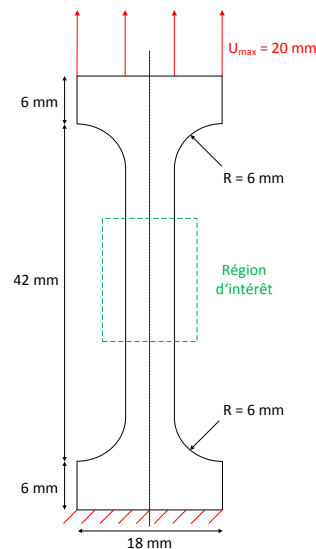


Figure 6 – Configuration de chargement étudiée

3.2. Résultats

Dans un premier temps, les performances de l'approche sont évaluées à partir de la comparaison du modèle proposé dans cette étude (GTN + bande cohésive + X-FEM), d'un modèle discontinu (GTN + X-FEM) et une approche continue (GTN). Sur la Figure 7 est tracée l'évolution de l'effort en fonction du déplacement de la partie supérieure de l'éprouvette.

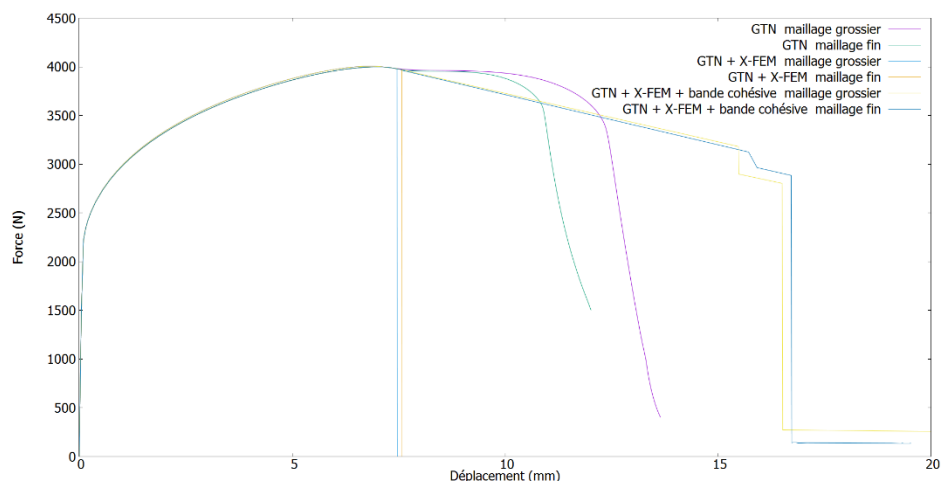


Figure 7 – Comparaison de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement pour les différents modèles

On peut constater sur la Figure 7, une dépendance à la taille de maille des résultats obtenus avec l'approche continue (GTN). En couplant un modèle de type GTN avec la X-FEM, on obtient une chute brutale de l'effort comme constaté par Crété et al [13]. Le modèle présenté dans cette étude donne à la fois, des résultats quasiment indépendants du maillage et une chute douce de l'effort. Sur la Figure 8 sont représentées les éprouvettes à la fin du calcul dans le cas de l'utilisation du modèle avec bande cohésive.

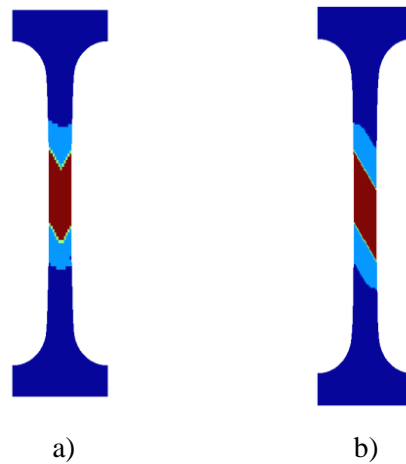


Figure 8 – Représentation des éprouvettes à la fin du calcul dans le cas de l'utilisation du modèle GTN + X-FEM + bande cohésive : a) maillage grossier et b) maillage fin (éléments en rouge → éléments X-FEM + bande cohésive)

On peut voir sur la Figure 8, une bande de localisation qui tend à former un angle d'environ 45° avec le plan de symétrie horizontal de la pièce. Dans un deuxième temps, on étudie l'influence de la pente de la loi cohésive sur l'évolution de l'effort en fonction du déplacement de la partie supérieure de l'éprouvette (voir Figure 9).

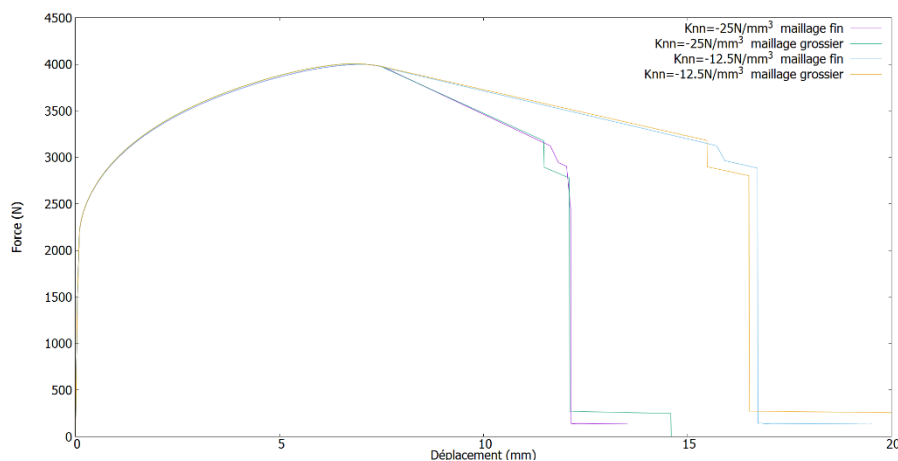


Figure 9 – Comparaison de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement pour différentes pentes de la loi cohésive

D'après la Fig.9, on constate comme attendu une dépendance de la partie adoucissante de la courbe à la pente de la loi cohésive. Encore une fois, on ne relève quasiment pas de dépendance au maillage quelle que soit la pente.

4. Conclusion

La méthodologie unifiée proposée consistant à insérer une bande cohésive dans le formalisme X-FEM permet de reproduire qualitativement les étapes successives de dégradation progressive d'une structure ductile, à savoir (i) l'endommagement diffus par croissance de cavités, (ii) la localisation de la déformation induite par la coalescence des cavités, et (iii) la fissuration.

La confrontation à des résultats expérimentaux sera menée à l'issue d'une campagne expérimentale en cours.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la DGA/MRIS et la Région Midi-Pyrénées pour leurs supports financiers.

Références

- [1] S. Feld-Payet, V. Chiaruttini, J. Besson, F. Feyel. A new marching ridges algorithm for crack path tracking in regularized media, *International Journal of Solids and Structures*, 71, 57-69, 2015.
- [2] J. Oliver, A.E. Huespe, E. Samaniego. A study on finite elements for capturing strong discontinuities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56, 2135-2161, 2003.
- [3] N. Moes, J. Dolbow, T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46, 131-150, 1999.
- [4] N. Moes, C. Stoltz, P.E. Bernard, N. Chevaugeon. A level set based model for damage growth: The thick level set approach, 86, 358-380, 2011.
- [5] K. Moreau, N. Moes, D. Picart, L. Stainier. Explicit dynamics with a non-local damage model using the thick level set approach, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 102, 808-838, 2015.
- [6] A. Salzmann, N. Moes, N. Chevaugeon. On use of the thick level set method in 3D quasi-static crack simulation of quasi-brittle material, *International Journal of Fracture*, 202, 21-49, 2016.
- [7] G. Ferté, P. Massin, N. Moes. 3D crack propagation with cohesive elements in the extended finite element method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 300, 347-374, 2016.
- [8] A.L. Gurson. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth : Part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99, 2-15, 1977.
- [9] V. Tvergaard, A. Needleman. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, 32, 157-169, 1984.
- [10] P. Longère, A. Dragon. Description of shear failure in ductile metals via back stress concept linked to damage-microporosity softening, *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 92-108, 2013.
- [11] T. Elguedj, A. Gravouil, A. Combescure. Appropriate extended functions for X-FEM simulations of plastic fracture mechanics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 501-515, 2006.
- [12] A. Martin, J.B. Esnault, P. Massin. About the use of standard integration schemes for X-FEM in solid mechanics plasticity, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 283, 551-572, 2015.
- [13] J.P. Crété, P. Longère, J.M. Cadou. Numerical modelling of crack propagation in ductile materials combining the GTN model and X-FEM, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 275, 204-233, 2014.