

Éléments finis enrichis pour la modélisation de la rupture des matériaux hétérogènes

N. Benkemoun¹, J.-B. Colliat¹, A. Ibrahimbegovic¹

¹ LMT, École Normale Supérieure de Cachan, France, {benkemoun,colliat,ai}@lmt.ens-cachan.fr

Résumé — Dans ce travail, nous proposons, dans le cadre de la modélisation des matériaux à matrice cimentaire, un modèle éléments finis reposant sur un treillis spatial dont la cinématique des éléments barres a été enrichie via deux discontinuités. La première, une discontinuité faible, permet d'utiliser des maillages non-adaptés à la géométrie des hétérogénéités et la seconde, une discontinuité forte, introduit la fissuration tout en gardant une objectivité à l'égard du maillage.

Mots clés — discontinuité forte, discontinuité faible, matériau cimentaire.

L'objectif de cet travail est de développer un modèle numérique capable de proposer une représentation fine des phénomènes de fissuration pour les matériaux quasi-fragiles à matrice cimentaire. Dans ce sens, l'échelle pertinente retenue est l'échelle mesoscopique. Le matériau peut être considéré comme bi-phasique (agrégats inclus dans un mortier, contenant lui même des inclusions de taille inférieure). Par ailleurs, de part la diversité des phénomènes de fissuration pour les matériaux quasi-fragiles comme le béton, il est nécessaire de mettre en place un modèle capable de représenter explicitement les fissures à l'interface agrégats/mortier et/ou dans n'importe quelles des deux phases (agrégats et mortier).

D'un point de vue numérique, le meso-modèle développé repose sur la méthode des Éléments Finis [1]. Nous avons choisi de travailler avec un treillis spatial dont la géométrie est obtenue par une triangulation de Delaunay.

Les hétérogénéités sont explicitement représentées par des inclusions sphériques. Le processus de maillage retenu pour tenir compte de ces inclusions est fondé sur un maillage non adapté aux interfaces [2], c'est-à-dire non contraint à suivre la position géométrique des interfaces ; certains éléments sont alors coupés en deux parties, chacune d'entre elles ayant des propriétés différentes. Une discontinuité faible (saut fini dans le champ de déformations) [3], [4] est donc introduite dans chaque élément afin de prendre en compte cette cinématique particulière. Ceci conduit à un processus de maillage qui ne dépend pas de la position et de la forme des inclusions. Considérons un matériau bi-phasique (agrégats et mortier), trois types d'éléments apparaissent : ceux entièrement inclus dans le mortier (discontinuité faible non activée), ceux entièrement inclus dans les agrégats (discontinuité faible non activée) et ceux coupés en deux par l'interface agrégats/mortier pour lesquelles la discontinuité faible est activée.

La fissuration et le comportement adoucissant observés pour des matériaux quasi-fragiles comme le béton sont introduits au moyen de discontinuités fortes (saut fini dans le champ de déplacements) [5], [6] au sein de chaque élément. Ces discontinuités représentent la micro-fissuration qui peut apparaître dans n'importe quelle phase (agrégats ou mortier) ainsi que le décohéation aux interfaces entre les deux phases. D'autre part, cette approche fondée sur une discontinuité forte peut aussi être utilisée à des échelles supérieures sur des structures hétérogènes [7].

Finalement, parmi toutes les méthodes ([8], [9]) existantes pour introduire les deux discontinuités au sein de l'élément, la "Enhanced Finite Element Method" (E-FEM) [10] avec la méthode des Modes Incompatibles [11], [12] a été choisie dont le cadre mathématique sous-jacent est la formulation variationnelle à trois champs indépendants de Hu-Washizu [13]. Ce modèle a été implanté dans le code Éléments Finis coFEAP [14], [15] afin de simuler des réponses sous divers types de chargement (voir [16]). Nous montrons comment l'introduction de mécanismes de dégradation locaux très simples (rupture en extension ou traction et ouverture en mode I) conduisent à des réponses macroscopiques beaucoup plus "riches".

Références

- [1] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor. *The Finite Element Method, Solid Mechanics*, volume 2. Butterworth Heinemann, Oxford, 5 edition, 2001.
- [2] T. Belytschko, C. Parimi, N. Moës, N. Sukumar, and S. Usui. Structured extended finite element methods for solids defined by implicit surfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56 :609–635, 2003.
- [3] M. Ortiz, Y. Leroy, and A. Needleman. A finite element method for localized failure analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 61 :189–214, 1987.
- [4] T. Belytschko, J. Fish, and B. E. Engelmann. A finite element with embedded localization zones. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 70 :59–89, 1988.
- [5] J. C. Simo, J. Oliver, and F. Armero. An analysis of strong discontinuities induced by strain-softening in rate independent inelastic solids. *Computational Mechanics*, 12 :277–296, 1993.
- [6] J. Oliver. Modelling strong discontinuities in solid mechanics via strain softening constitutive equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39 :3575–3623, 1996.
- [7] M. Hautefeuille, S. Melnyk, J.-B. Colliat, and A. Ibrahimbegovic. Probabilistic aspects of localized failure of massive heterogeneous structures. *International Journal of Engineering Computations*, 26 :166–184, 2009.
- [8] N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 46 :131–150, 1999.
- [9] T. Strouboulis, K. Copps, and I. Babuška. The generalized finite element method : An example of its implementation and illustration of its performance. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47 :1401–1417, 2000.
- [10] A. Ibrahimbegovic and S. Melnyk. Embedded discontinuity finite element method for modeling of localized failure in heterogeneous materials with structured mesh : an alternative to extended finite element method. *Computational Mechanics*, 40 :149–155, 2007.
- [11] J. C. Simo and M. Rifai. A class of mixed assumed strain methods and the method of incompatible modes. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 29 :1595–1638, 1990.
- [12] A. Ibrahimbegovic and E. L. Wilson. A modified method of incompatible modes. *Communication in applied numerical methods*, 7 :187–194, 1991.
- [13] K. Washizu. *Variational methods in elasticity and plasticity*. Pergamon Press, New York, 3 edition, 1982.
- [14] R. L. Taylor. *FEAP – A Finite Element Analysis Program Version 8.2 User Manual*. Departement of Civil and Environmental Engineering – University of California at Berkeley, March 2008. <http://www.ce.berkeley.edu/~rlt/feap/manual.pdf>.
- [15] C. Kassiotis and M. Hautefeuille. *coFeap's Manual*, 2008. http://www.lmt.ens-cachan.fr/cofeap/files/cofeap_manual.pdf.
- [16] N. Benkemoun, M. Hautefeuille, J.-B. Colliat, and A. Ibrahimbegovic. Modeling heterogeneous materials failure : 3D meso-scale models with embedded discontinuities. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 82 :1671–1688, 2010.