



HAL
open science

Une nouvelle méthode de volume immergé pour la modélisation numérique de l'endommagement ductile à l'échelle des microstructures

Modesar Shakoor, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard

► To cite this version:

Modesar Shakoor, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard. Une nouvelle méthode de volume immergé pour la modélisation numérique de l'endommagement ductile à l'échelle des microstructures. CSMA 2015 - Le 12ème Colloque National en Calcul des Structures, École Centrale de Nantes: GeM, ENSTA Brest: LMBS, INSA Rennes: LGCGM, Arts et Métiers ParisTech Angers: LAMPA, Université de Bretagne-Sud Lorient: LIMATB, Université de La Rochelle: LASIE, May 2015, Giens, France. hal-01247733

HAL Id: hal-01247733

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01247733>

Submitted on 22 Dec 2015

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.

Une nouvelle méthode de volume immergé pour la modélisation numérique de l'endommagement ductile à l'échelle des microstructures

Modesar Shakoor, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard

CEMEF, Mines ParisTech, {modesar.shakoor,marc.bernacki,pierre-olivier.bouchard}@mines-paristech.fr

Résumé — Une nouvelle méthode de volume immergé est présentée pour simuler la germination, croissance et coalescence de porosités à l'échelle des microstructures composant les matériaux métalliques ductiles. En s'appuyant sur un outil de remaillage automatique spécialement développé durant ce travail, la méthode proposée permet des analyses éléments finis en grandes déformations, ainsi que la modélisation de la germination et de la coalescence, là où la plupart des travaux se limitent à la prédiction de l'apparition de ces deux phénomènes.

Mots clés — rupture ductile, analyse éléments finis, germination, croissance, coalescence

1. Introduction

Afin de prédire l'endommagement et la rupture ductile des matériaux métalliques au cours de leur mise en forme, une classe importante de modèles est celle des modèles dits microscopiques, ou micromécaniques. Bien que ces modèles soient utilisés à l'échelle macroscopique, l'endommagement est prédit en se basant sur des lois d'évolution du taux de porosité du matériau par germination, croissance et coalescence de vides à l'échelle microscopique. Ces lois d'évolution sont généralement établies à l'aide d'analyses éléments finis sur des microstructures simples [1]. Ainsi, un vide est placé à l'intérieur d'une matrice infinie, modélisée à l'aide de conditions aux limites périodiques, qui peuvent également permettre de considérer des arrangements périodiques. La géométrie des pores de la microstructure est dans la plupart des cas considérée sphérique ou elliptique. Selon la forme utilisée et le chargement appliqué, des modèles de croissance et de coalescence peuvent être postulés et généralisés pour homogénéiser cette microstructure à l'échelle macroscopique. Des analyses similaires sont réalisées pour établir des modèles de germination, en remplaçant les vides par des inclusions.

Ces analyses éléments finis soulèvent néanmoins de nombreuses questions concernant l'influence de la morphologie des pores/inclusions de la microstructure et de leur arrangement, idéalisés dans ces travaux. De même, puisque ces travaux se limitent à l'établissement de critères prédictifs dans le cas de la germination tout comme de la coalescence, l'influence de la rupture locale d'inclusions ou de la matrice sur le reste de la microstructure ne peut être étudiée. Au cours du présent travail, une nouvelle méthode numérique a été développée pour étendre ces analyses au-delà de ces limitations. Cette méthode se base sur une approche par volume immergé, très largement utilisée dans l'étude des interactions fluide/structure.

2. Méthode

2.1. Aspects numériques

La méthode de volume immergé consiste à n'utiliser qu'un seul maillage pour une simulation pouvant contenir plusieurs corps. Dans le cas présent, ce maillage porte trois phases : la matrice, les inclusions et les vides. Les interfaces entre ces phases sont *explicitement* représentées par des faces internes du maillage, contrairement aux méthodes *implicites*, où les interfaces peuvent traverser des

éléments. Cette méthode *explicite*, ou *body-fitted*, assure la continuité du champ de vitesse aux interfaces, et une meilleure précision des champs de contrainte et de déformation locaux bien qu'ils soient discontinus. Ces champs sont d'une importance majeure pour la prédiction de la germination et de la coalescence. La difficulté d'une méthode *explicite* réside dans les opérations de remaillage qui ont, contrairement aux méthodes *implicites*, la contrainte de devoir préserver les interfaces. Pour les besoins de l'étude présente, un outil de génération et adaptation de maillages *explicites*, appelé Fitz, a été spécialement développé. La génération est réalisée à partir d'une représentation *implicite* des interfaces, constituée de fonctions de distance signée aux interfaces, ou fonctions Level-Set (LS) :

$$\forall t, \begin{cases} \psi(x, t) = \pm d(x, \Gamma(t)), x \in \Omega, \\ \Gamma = \{x \in \Omega, \psi(x, t) = 0\}, \end{cases} \quad (1)$$

où $d(.,.)$ est la distance euclidienne, ψ désigne la fonction de distance signée à une interface Γ , et Ω le domaine global. La librairie de calcul éléments finis parallèle CimLib, utilisée ici, permet de calculer cette fonction LS pour une grande variété de formes, ainsi que pour des microstructures issues d'images réelles. Le mailleur/remailleur Fitz [6] se base sur cette fonction pour localiser l'interface avec un coût linéaire et découper les éléments qu'elle traverse en autant d'éléments que nécessaire, créant ainsi un premier maillage *explicite*. Ce maillage étant généralement de mauvaise qualité, comme montré dans la Figure 1(b), l'outil est ensuite capable d'adapter le maillage de manière anisotrope en préservant les interfaces, voire en adaptant également les maillages surfaciques correspondant, comme illustré dans la figure Figure 1(c). Ces opérations de remaillage anisotrope sont indispensables ici pour atteindre de grandes déformations plastiques avec des coûts minimaux. Notons que l'outil présenté ici a des applications potentielles en simulations d'interactions fluide/structure dans un cadre Lagrangien ou Eulérien-Lagrangien Arbitraire, pour de grands déplacement et de grandes déformations. Néanmoins, la mécanique de la rupture présente un défi numérique important : modéliser l'apparition instantanée de nouvelles interfaces (discontinuités) pendant la simulation.

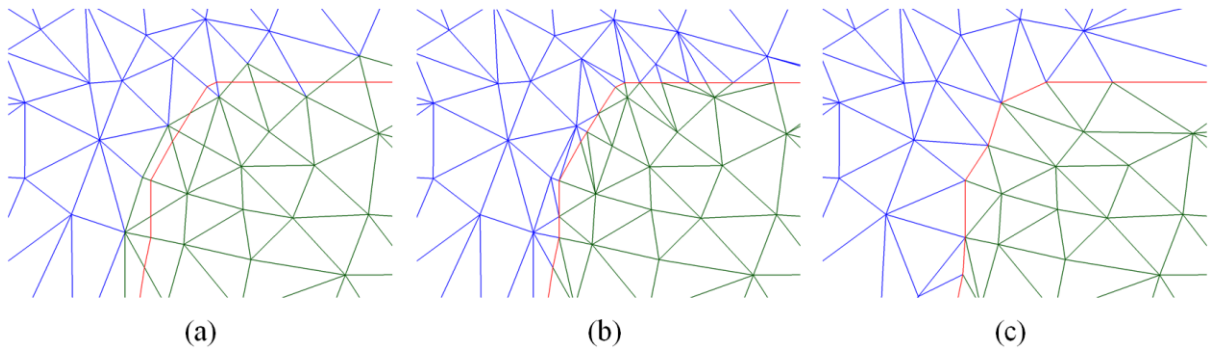


Figure 1 : (a) représentation implicite d'une interface, (b) exemple de génération et (c) d'adaptation de maillage surfacique avec Fitz.

2.2. Aspects mécaniques

Bien qu'il n'y ait qu'un seul maillage, et donc un seul problème mécanique à résoudre, le comportement est défini individuellement sur chaque élément du maillage selon la phase à laquelle il appartient. Pour la matrice, on se place dans le cadre de la mise en forme à froid, et on choisit donc un comportement élasto-plastique avec écrouissage isotrope. Les inclusions sont considérées élastiques, comme dans la plupart des travaux existants dans la littérature [1,2]. Il est important de rappeler ici que les vides sont intégrés au maillage, ils ont donc leur comportement propre, qui est défini comme celui d'un fluide Newtonien compressible. La calibration des viscosités dynamiques et volumiques de ce fluide a été discutée dans des publications précédentes [4,6], et montre la précision de cette approche.

Cette modélisation permet telle qu'elle de modéliser la croissance de porosités, ainsi que les interactions matrice/inclusion au cours de la déformation. Elle doit néanmoins être complétée pour modéliser la rupture d'inclusions, la décohésion des interfaces matrice/inclusions et la coalescence. La rupture d'inclusion, pour commencer, est prédite par un critère tout simplement basé sur la contrainte principale maximale dans la particule [2,5]. Lorsque cette contrainte atteint un certain seuil, la rupture est déclenchée en brisant instantanément l'inclusion en deux selon la direction perpendiculaire à la contrainte principale maximale. La prédiction de la décohésion est quant à elle basée sur une définition de la contrainte à l'interface, qui a été introduite dans [3,5]. De même, le critère est atteint lorsque cette contrainte atteint une certaine résistance limite en un point donné de l'interface, et la décohésion est alors déclenchée en séparant la matrice de l'inclusion en ce point. Dans le cas de la coalescence, un modèle d'endommagement de Lemaître est utilisé pour définir l'endommagement de la matrice [6]. Lorsqu'une paire de vides de la simulation peut être reliée par une bande de localisation d'endommagement, la matrice est rompue par un « tunnel » (chemin de rupture linéaire) reliant ces deux vides, et inscrit dans la bande. Dans les trois cas, la rupture de l'inclusion, de l'interface, ou de la matrice, est produite par la création d'un germe artificiel. Ce germe est un plan avec une certaine épaisseur dans le cas de la rupture, où il entraîne une perte de matière pour l'inclusion. En cas de décohésion, il s'agit d'un germe de la forme d'une demi-sphère, qui entraîne une perte de matière pour la matrice. Lors de la coalescence de deux vides, c'est également la matrice qui subit une perte de matière, puisqu'elle est localement remplacée par un tunnel reliant les deux vides. Ces trois cas sont illustrés dans la Figure 2.

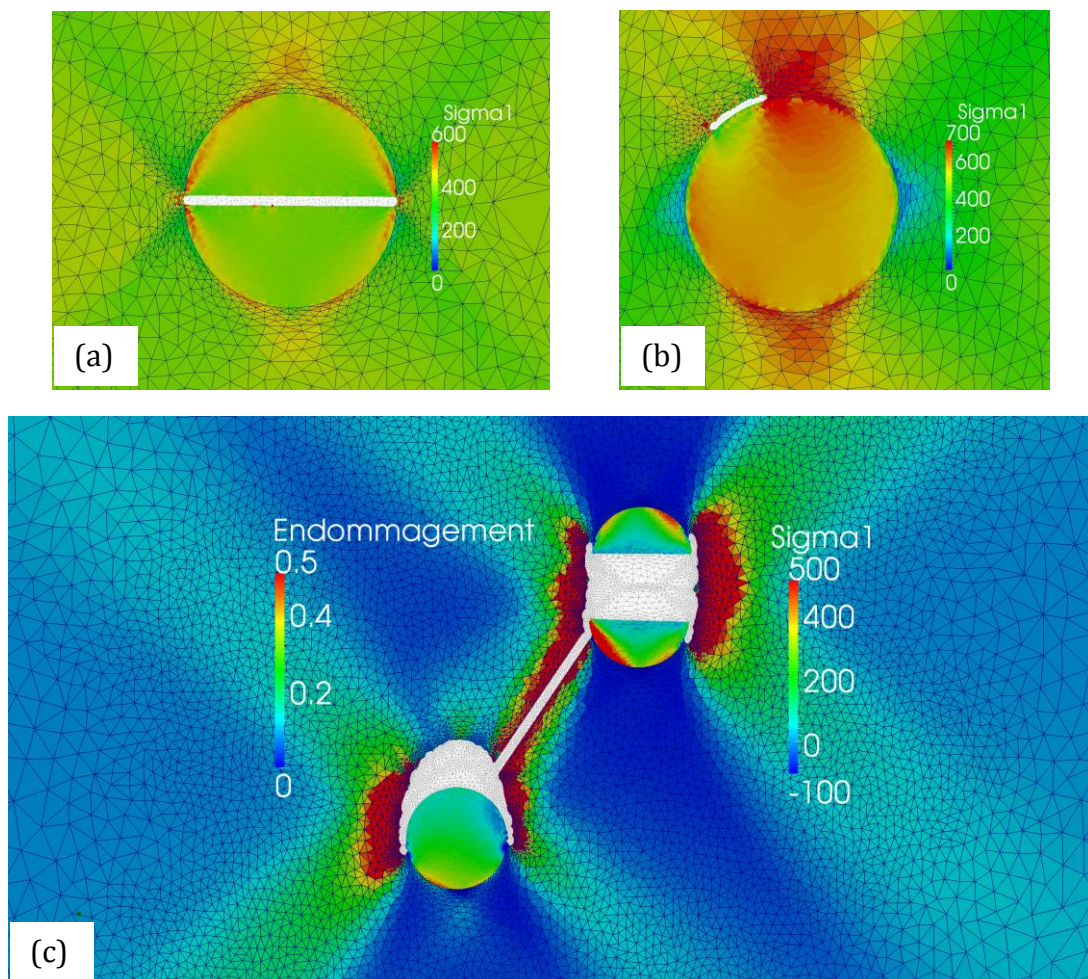


Figure 2 : (a) fracture d'une inclusion, (b) décohésion à l'interface entre une inclusion et la matrice et (c) coalescence de deux vides par rupture de la matrice.

La présence d'une perte de matière n'est pas sans rappeler la méthode *kill-element*, où des éléments du maillage sont entièrement supprimés pour simuler la propagation d'une fissure. En comparaison à cette méthode, la technique présente a l'intérêt de s'affranchir de la dépendance à la forme des éléments supprimés. En effet, la technique de remaillage présentée précédemment n'impose pas de forme pour le germe, puisque quelle que soit celle-ci elle sera modélisée par une fonction LS avant d'être explicitement décrite par le maillage. Les trois formes choisies ici pour les trois cas de rupture correspondent tout simplement aux faciès de rupture observés dans les travaux expérimentaux. Enfin, la dépendance à la taille de ces germes a été étudiée dans une publication précédente, où les résultats ont montré la convergence de la méthode lorsque la taille des germes décroît [6].

Après toute rupture, le problème mécanique global est résolu une nouvelle fois pour vérifier qu'un des critères n'est pas atteint dans le nouvel état mécanique. Si c'est le cas, la procédure est réitérée, jusqu'à atteindre un état d'équilibre où plus aucune germination ou coalescence n'est prédite. On peut alors procéder à l'incrément temporel suivant. Ce couplage fort est essentiel car la germination en un point d'une microstructure a généralement tendance, tout comme la coalescence, à se propager rapidement, voire instantanément, aux points voisins.

3. Conclusion

Une fois complétés par des modèles mécaniques appropriés, les outils numériques développés au cours de cette étude permettent de conduire des simulations sur les cas envisagés, comme montré en Figure 2. Des microstructures complexes issues d'images réelles peuvent être immergées dans les maillages de calcul et étudiées en grande déformation plastique. D'une part, les résultats obtenus montrent que les singularités géométriques de ces microstructures influencent grandement leur endommagement. D'autre part, l'arrangement de ces microstructures a une influence importante sur le taux d'évolution de l'endommagement ainsi que sur son amplitude, même pour des géométries idéalisées. Enfin, ces développements ouvrent évidemment des voies intéressantes concernant la comparaison avec des travaux expérimentaux.

Références

- [1] A.A. Benzerga, J.B. Leblond. Ductile Fracture by Void Growth to Coalescence, *Advances in Applied Mechanics*, 44:169-305, 2010.
- [2] J. Fitoussi, G. Guo, D. Baptiste. Determination of a tridimensional failure criterion at the fibre/matrix interface of an organic-matrix/discontinuous-reinforcement composite, *Composites Science and Technology*, 56:755-760, 1996.
- [3] B.J. Lee, M.E. Mear. Stress concentration induced by an elastic spheroidal particle in a plastically deforming solid, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47:1301-1336, 1999.
- [4] E. Roux, M. Bernacki, P.-O. Bouchard. A level-set and anisotropic adaptive remeshing strategy for the modeling of void growth under large plastic strain, *Computational Materials Science*, 68:32-46, 2013.
- [5] E. Roux, M. Shakoov, M. Bernacki, P.-O. Bouchard. A new finite element approach for modelling ductile damage void nucleation and growth—analysis of loading path effect on damage mechanisms, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 22:075001, 2014.
- [6] M. Shakoov, M. Bernacki, P.-O. Bouchard. A new body-fitted immersed volume method for the modeling of ductile fracture: analysis of void clusters and stress state effects on coalescence, *Engineering Fracture Mechanics*, Submitted, 2014.