



Modélisation des micro mécanismes d'endommagement ductile par une approche couplant fonctions level-set et adaptation anisotrope de maillage

Emile Roux, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard

► To cite this version:

Emile Roux, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard. Modélisation des micro mécanismes d'endommagement ductile par une approche couplant fonctions level-set et adaptation anisotrope de maillage. CSMA 2013 - 11ème colloque national en calcul des structures, May 2013, Giens, France. hal-00861396

HAL Id: hal-00861396

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00861396>

Submitted on 12 Sep 2013

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.

Modélisation des micro mécanismes d'endommagement ductile par une approche couplant fonctions level-set et adaptation anisotrope de maillage

Emile ROUX ¹, Marc BERNACKI ¹, Pierre-Olivier BOUCHARD ¹ *

¹Mines ParisTech, CEMEF - Centre de Mise en Forme des Matériaux, CNRS UMR 7635, BP 207, 1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France, pierre-olivier.bouchard@mines-paristech.fr

* Auteur correspondant

Résumé — Au cours des dix dernières années, une attention particulière a été portée à la modélisation de l'endommagement ductile et à l'enrichissement des modèles macroscopiques pour des trajets de chargement complexes. Cependant, les mécanismes d'endommagement ductile sont fortement liés à la microstructure des matériaux étudiés. Nous nous intéressons ici aux hétérogénéités liées à la présence d'inclusions dans une matrice métallique élastoplastique. Une approche couplant méthodes level-set et adaptation anisotrope de maillage est présentée ici pour modéliser des microstructures hétérogènes complexes en 2D ou en 3D. Des critères de germination, de croissance et de coalescence de porosités sont présentés. Ces critères sont utilisés dans l'étude de Volumes Élémentaires Représentatifs (VERs) contenant une ou plusieurs inclusions et soumis à différents modes de chargement en grandes déformations plastiques.

Mots clés — endommagement ductile, modélisation micro, approche level-set, adaptation anisotrope de maillage

1. Introduction

Au cours des dix dernières années, une attention particulière a été portée à la modélisation de l'endommagement ductile et à l'enrichissement des modèles macroscopiques pour des trajets de chargement complexes [1-5]. L'enrichissement de ces modèles peut être effectué de manière phénoménologique au travers d'essais mécaniques permettant de faire varier la triaxialité des contraintes et l'angle de Lode [1-3]. Il peut également être réalisé sur la base d'observations microstructurales [4] ou de calculs sur cellules élémentaires [5].

Pour comprendre l'influence des trajets de chargement et de la microstructure sur l'évolution de l'endommagement ductile, une approche numérique a été développée afin de modéliser les mécanismes de germination, croissance et coalescence de porosités pour de grandes déformations plastiques.

Pour cela, nous travaillons sur des Volumes Élémentaires Représentatifs (VERs) contenant des inclusions et des porosités plongées dans une matrice homogène élastoplastique. Les interfaces entre inclusions, porosités et matrice sont représentées par des fonctions level-set. Une technique de remaillage anisotrope est utilisée pour bien représenter ces interfaces tout en préservant un temps de calcul raisonnable. Cette technique de remaillage adaptatif anisotrope du maillage est particulièrement bien adaptée aux problématiques liées à l'endommagement ductile [6, 7].

Cette approche, permettant de modéliser des microstructures hétérogènes complexes 2D ou 3D, sera présentée dans la première partie de cet article. Dans la seconde partie, nous présenterons les critères de germination (par décohésion inclusion-matrice ou par fragmentation d'inclusions) et de coalescence implémentés. Enfin la troisième partie sera consacrée à l'application de ces critères pour différents trajets de chargement.

2. Maillage de microstructures hétérogènes complexes

Nous considérons ici le cas de microstructures contenant des inclusions et des porosités plongées dans une matrice élastoplastique. Les VERs que nous représentons contiennent donc 3 phases. Les interfaces entre ces phases sont représentées par des fonctions level-set. La précision de la représentation éléments finis de ces interfaces level-set nécessite cependant un maillage particulièrement fin au niveau des interfaces. Pour cela, nous utilisons un maillage adaptatif anisotrope.

2.1. Approche level-set

La description des interfaces entre les inclusions, la matrice et les zones de vide est réalisée de manière implicite. Cette description est basée sur des fonctions level-set. Les fonctions level-set utilisées sont de type distance signée sur l'ensemble du maillage du VER. L'iso-valeur zéro de ces fonctions permet de matérialiser les différentes interfaces. Le signe de ces fonctions en chaque élément (respectivement nœud) du maillage permet de déterminer l'appartenance, ou non, de cet élément (respectivement nœud) à une phase.

La description du VER nécessite la définition de 3 level-sets ϕ_i , ϕ_m et ϕ_v respectivement rattachées à la phase représentant les inclusions, la matrice et le vide. Le signe de ces fonctions, en chaque point x du domaine, permet de définir l'ensemble de la microstructure :

$$\begin{cases} x \in Inclusion \Leftrightarrow \phi_i(x) \geq 0 \\ x \in Matrice \Leftrightarrow \phi_m(x) \geq 0 \\ x \in Vide (porosité) \Leftrightarrow \phi_v(x) = -\max(\phi_i(x), \phi_m(x)) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Cette approche permet de définir la microstructure, et donc d'associer à chaque phase un comportement mécanique propre. Cependant, la description implicite de ces interfaces implique que les éléments proches de l'interface (i.e. proches de l'iso-valeur zéro de la level-set) ont un comportement intermédiaire. Dans cet article le choix est fait de réaliser un mélange linéaire des propriétés mécaniques basé sur les fonctions level-set :

$$P_{mat} = (\alpha_v(\phi_v)P_v + (1 - \alpha_v(\phi_v))P_i)(1 - \alpha_m(\phi_m)) + \alpha_m(\phi_m)P_m \quad (2)$$

Où P_{mat} est un paramètre matériaux du mélange, P_v , P_i et P_m sont, respectivement, les paramètres matériaux représentatifs des porosités, des inclusions et de la matrice, et $\alpha_i(\phi_i)$ est la fonction fraction de phase rattachée à la phase $i \in \{v, i, m\}$. En pratique les paramètres définissant le modèle élastoplastique sont mélangés.

2.2. Maillage adaptatif anisotrope

L'utilisation de cette description implicite par level-set et de mélange des propriétés mécaniques nécessite un maillage adapté. Il est notamment important que le maillage soit suffisamment raffiné au niveau des interfaces pour assurer la précision des résultats. Outre cette description des interfaces, il est aussi important d'avoir un maillage adapté au calcul mécanique et ce dans le cadre de grandes déformations plastiques.

Pour atteindre cet objectif le mailleur topologique MTC est utilisé [8]. Ce mailleur est basé sur l'optimisation locale de la topologie du maillage. La qualité de ce maillage est maximisée sur la base du facteur de forme de chaque élément. Ce facteur de forme est calculé via la métrique locale de chaque élément. La définition de cette métrique permet donc de contrôler le maillage.

La métrique, qui permet de contrôler le maillage, est construite grâce à l'estimation de l'erreur *a posteriori* liée à un champ physique issu du calcul éléments finis [9]. Dans cet article la technique de

maillage/remillage est faite en deux étapes. La première étape consiste à calculer 2 métriques : l'une basée sur l'évaluation de l'erreur *a posteriori* liée aux fonction level-set (M_d), l'autre sur l'erreur *a posteriori* liée à la contrainte équivalent (M_m). La deuxième étape permet de mélanger ces deux métriques pour en obtenir une seule :

$$\begin{aligned} & \text{si } \max_{i \in \{v,i,m\}} |\varphi_i(x)| < D_{\min} : M = M_d \\ & \text{si } D_{\min} \leq \max_{i \in \{v,i,m\}} |\varphi_i(x)| \leq D_{\max} : M = \frac{M_d - M_m}{D_{\min} - D_{\max}} \left(\max_{i \in \{v,i,m\}} |\varphi_i(x)| - D_{\min} \right) + M_d \\ & \text{si } D_{\max} < \max_{i \in \{v,i,m\}} |\varphi_i(x)| : M = M_m \end{aligned} \quad (3)$$

Ce mélange fait intervenir les fonctions level-set ainsi que les distances caractéristiques du mélange ($D_{\min}$ et $D_{\max}$). Grâce à cette approche le maillage est adapté au suivi des interfaces (via la métrique M_d) et au calcul mécanique (via la métrique M_m). La figure 1.c illustre un exemple de maillage obtenu.

Cette représentation implicite des porosités ainsi que la technique de maillage est présentée plus en détail dans [7]. Cette approche a également été utilisée avec succès dans le cadre de la modélisation de l'endommagement ductile à l'échelle macroscopique [6].

3. Modélisation de la germination, croissance et coalescence

Dans cette partie, nous décrivons essentiellement les étapes de germination et de coalescence qui nécessitent des développements numériques spécifiques. La phase de croissance des porosités est gérée naturellement par la déformation plastique de la matrice [7]. Au-delà des critères mécaniques perfectibles cités ci-dessous, c'est surtout la méthodologie numérique qui sera mise en avant.

3.1. Modélisation de la germination

La phase de germination repose sur la fragmentation des inclusions ou la décohésion à l'interface matrice-inclusion. Il s'agit d'une phase particulièrement délicate à modéliser. Il faut d'une part définir des critères de rupture les plus physiques possible, et d'autre part être capable de modéliser la rupture interfaciale ou la fragmentation de l'inclusion dans une approche éléments finis.

Le **critère de rupture interfaciale** est défini à partir des contraintes normales et tangentielles à l'interface. La décohésion interviendra lorsque :

$$\sigma_n + \beta |\sigma_\tau| > \sigma_{\text{int}}^c, \quad (4)$$

où σ_n et σ_τ représentent, respectivement, les contraintes normales et tangentielles calculées à l'interface inclusion-matrice, et σ_{int}^c représente la contrainte critique de rupture. β est un paramètre du critère de rupture (β sera choisi égal à 1 dans cet article). D'un point de vue numérique, cette rupture est traitée par la création d'un micro-germe, représentant une micro-porosité apparue à l'interface. Cette micro-porosité est définie par une fonction level-set, et la même technique d'adaptation de maillage présentée précédemment est utilisée.

Le **critère de fragmentation** est défini à partir de la contrainte principale maximale σ_I dans l'inclusion. Lorsque σ_I dépasse une valeur critique σ_{frag}^c l'inclusion est rompue instantanément perpendiculairement à l'orientation de la contrainte principale maximale. Cette rupture est définie en introduisant une fonction level-set traversant l'inclusion de part en part.

La Figure 1 illustre les critères de germination retenus (a et b) ainsi que l'adaptation de maillage autour des fonctions level-set générées pour modéliser la décohésion matrice-inclusion et la fragmentation de l'inclusion (Figure 1.c).

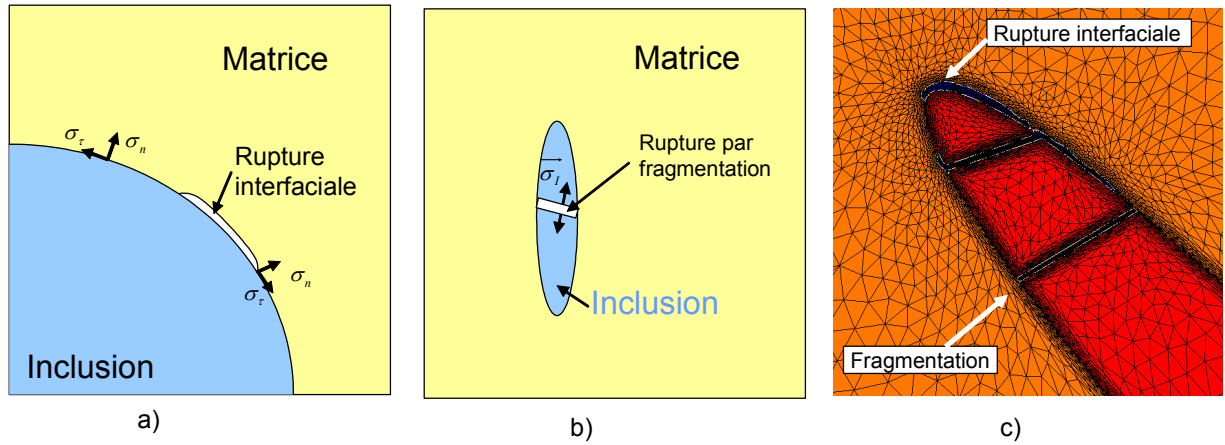


Figure 1. Mécanismes de a) rupture interfaciale, b) rupture par fragmentation et c) illustration du raffinement de maillage adaptatif pour les deux mécanismes de germination.

3.2. Modélisation de la coalescence

Pour la coalescence, le mécanisme de rupture est déclenché lorsque la déformation plastique dans le ligament plastique entre deux porosités atteint une valeur critique. La rupture peut alors être modélisée soit par l'utilisation de micro-germes tels que présentés précédemment, soit par l'utilisation d'un plan de rupture, perpendiculaire à la direction de contraintes principales maximales, tel que celui utilisé pour la fragmentation d'inclusions. La première approche est plus progressive mais peut introduire une légère perte de volume en fonction de la taille des micro-germes introduits tandis que la seconde approche est plus brutale.

Il est important de noter qu'il est assez facile de faire évoluer ce critère de coalescence, par exemple en se basant sur une distance critique entre porosités.

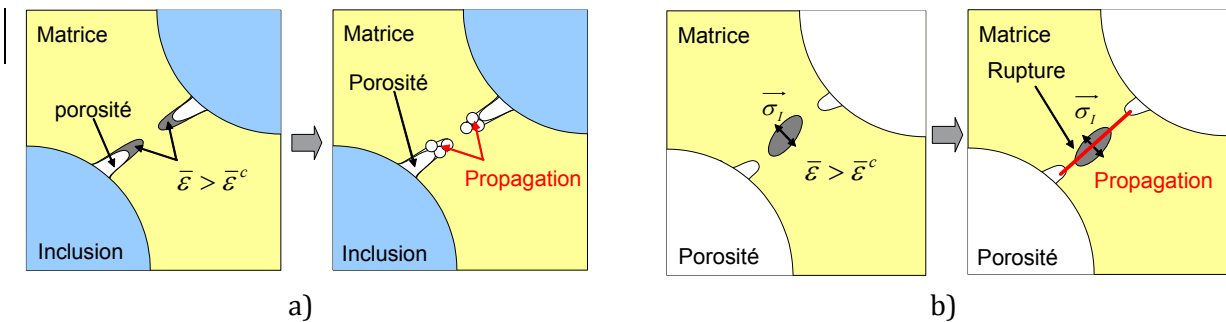


Figure 2. Critères de coalescence : a) coalescence à partir de micro-germes et b) coalescence à partir d'un plan de rupture.

4. Applications

Pour les applications suivantes, nous considérons un domaine 2D contenant 5 inclusions (Figure 3.a), et extrait d'un domaine plus grand provenant de l'analyse d'une image obtenue au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux phases de germination en fonction des valeurs retenues pour déclencher la rupture par décohésion ou par fragmentation, et en fonction des conditions aux limites appliquées au Volume Élémentaire Représentatif (VER) ainsi défini. La matrice ainsi que les inclusions sont considérées comme élastoplastiques et leur courbe d'écrouissage est représentée sur la Figure 3.b.

4.1. Influence des propriétés à rupture des inclusions

Les conditions aux limites appliquées au VER sont les suivantes : contraintes normales de traction appliquées sur les côtés inférieur et supérieur, et surfaces libres ailleurs.

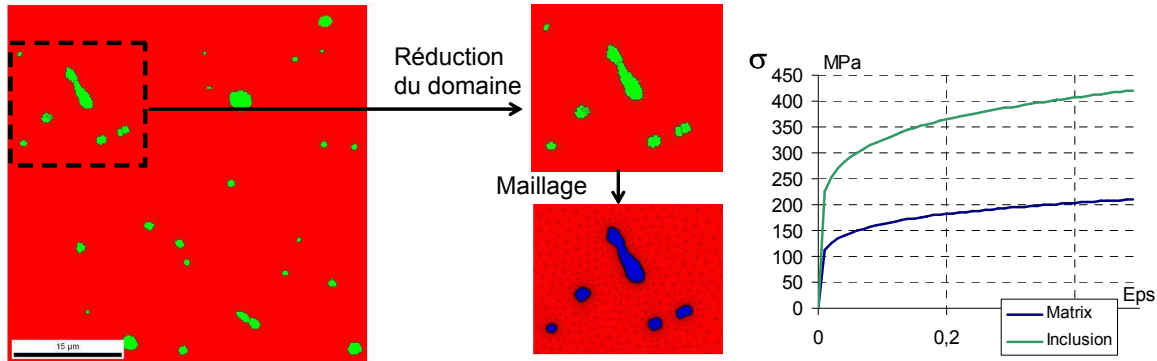


Figure 3. a) Description et maillage du domaine hétérogène étudié et b) courbe d'écrouissage des inclusions et de la matrice.

Afin d'évaluer la robustesse du modèle ainsi que sa capacité à dissocier les phases de germination par décohesion ou par fragmentation, cinq configurations sont comparées en faisant varier les valeurs critiques σ_{int}^c (relative à la décohesion) et σ_{frag}^c (relative à la fragmentation) :

- Cas 1 : aucune germination.
- Cas 2 : configuration de référence pour laquelle la fragmentation est privilégiée.
- Cas 3 : configuration inverse à la configuration de référence, pour laquelle la décohesion est privilégiée.
- Cas 4 : configuration de référence avec des valeurs critiques de germination plus élevées.
- Cas 5 : configuration de référence avec des valeurs critiques de germination plus basses.

Les valeurs associées à ces 5 configurations sont données dans le Tableau 1.

	Cas 1 (pas de germination)	Cas 2 (Référence)	Cas 3 (Inverse Ref.)	Cas 4 (Ref. * 1.5)	Cas 5 (Ref. * 0.5)
σ_{frag}^c	∞	200 MPa	300 MPa	300 MPa	100 MPa
σ_{int}^c	∞	300 MPa	200 MPa	450 MPa	150 MPa

Tableau 1. Valeurs critiques de germination pour les 5 configurations testées.

La Figure 4 montre l'évolution du volume de porosités ainsi que de la contrainte équivalente en fonction de la déformation équivalente. Pour le cas 1, il n'y a pas de germination et on retrouve donc la courbe d'écrouissage du VER homogénéisé sans adoucissement. Les cas 2 (décohesion favorisée) et cas 3 (fragmentation favorisée) présentent des résultats similaires en terme d'évolution du volume de porosités et de courbe d'écrouissage. Le cas 4 présente bien une évolution retardée de la germination, qui se traduit par un volume de porosités inférieur aux cas 2 et 3. Enfin, pour le cas 5, la germination intervient plus rapidement, conduisant ainsi à un adoucissement plus rapide de la courbe contrainte-déformation. Ces observations se retrouvent également sur la Figure 5 où chaque configuration est représentée après une déformation macroscopique égale à 0.1. Il est intéressant de constater que les configurations 2 et 3 présentent un mécanisme de germination bien différent, et qui conduit finalement à un volume de porosité équivalent. Pour le cas 4, les mécanismes de germination sont très proches de ceux du cas 2. On remarque cependant que l'inclusion en bas à gauche n'a pas donné lieu à une

germination, contrairement au cas 2. Enfin pour le cas 5, la germination est clairement facilitée, avec notamment une fragmentation exagérée des inclusions.

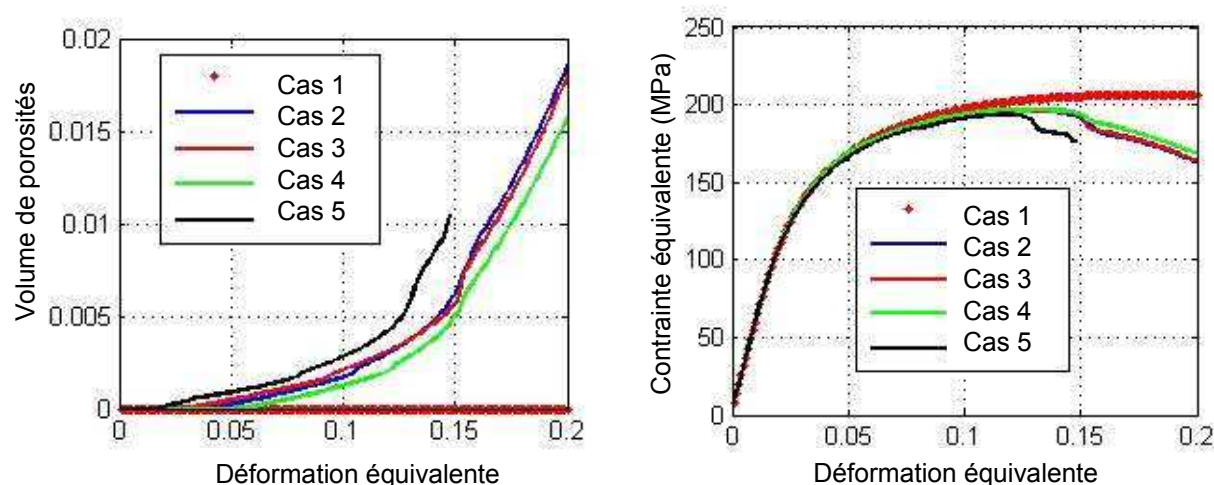


Figure 4. Evolution du volume de porosités (a) et de la contrainte équivalente (b) en fonction de la déformation équivalente pour les 5 configurations.

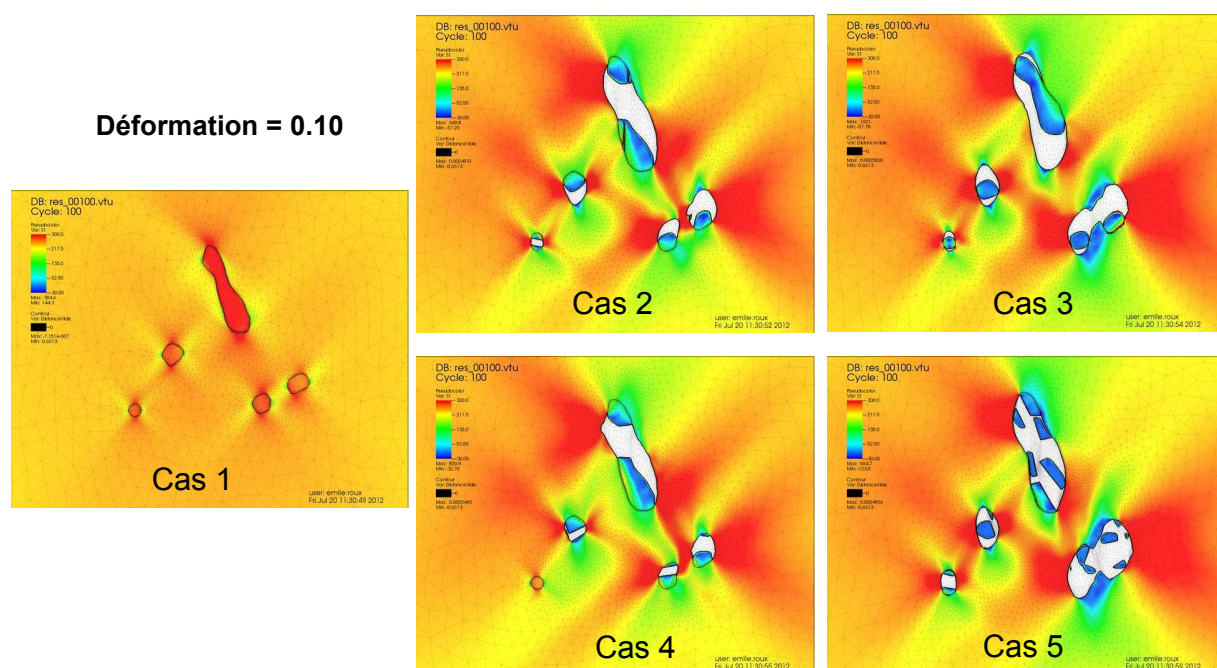


Figure 5. Illustration de la germination pour les 5 configurations après une déformation égale à 0.1 (champs de contrainte équivalente).

4.2. Influence du chargement

Dans ce deuxième exemple, nous reprenons la même configuration géométrique ainsi que le même comportement élastoplastique pour les inclusions et la matrice. Les propriétés à rupture des inclusions sont celles du cas 3 et du cas 5 définies dans le Tableau 1. Un chargement en cisaillement est maintenant appliqué sur les bords inférieur et supérieur du VER. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 6.

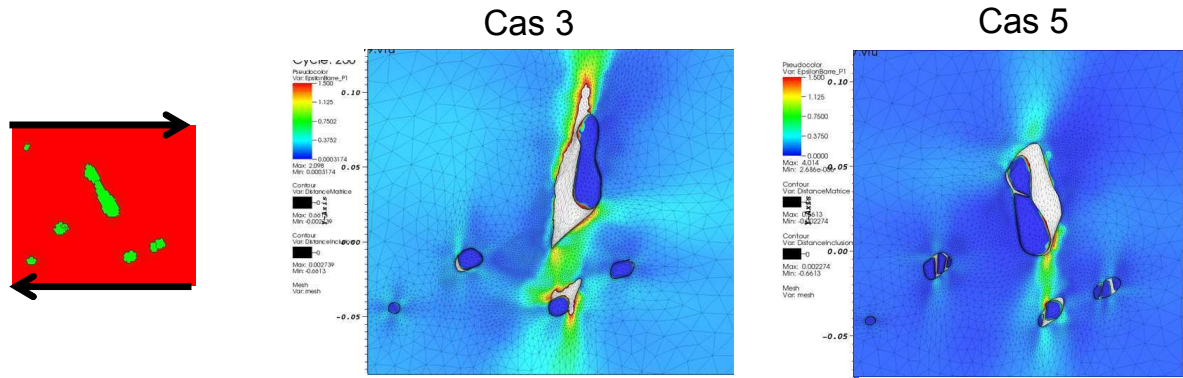


Figure 6. Illustration de la germination et de la croissance des porosités en cisaillement pour les cas 3 et 5.

On remarque des mécanismes de germination et de croissance bien différents de ceux observés en traction. Pour le cas 3, la germination par décohesion est plutôt favorisée, comme lors de la traction. On observe 2 germinations majeures. Le mode de croissance est ici bien différent de celui observé en traction. Pour le cas 5, la germination est mixte (fragmentation et décohesion). Nous n'observons cependant pas de multi-fragmentations comme observées en traction. Une porosité prépondérante apparaît après décohesion sur l'inclusion la plus grosse.

4.3. Croissance et coalescence 3D

Enfin, dans ce dernier exemple, la méthodologie de germination, croissance et de coalescence (basée sur les micro-germes) a été testée dans une configuration tridimensionnelle. Un VER 3D, contenant deux inclusions sphériques plus rigides que la matrice, et disposées à 45° vis-à-vis de l'axe de traction, est sollicité en traction.

Après la phase de germination, les porosités, représentées en gris sur la Figure 7, croissent aux deux pôles des inclusions (Figure 7.b). Lorsque ces porosités sont proches l'une de l'autre, une interaction apparaît (Figure 7.c) et conduit à la coalescence illustrée par les Figures 7.d à 7.e. Ces résultats préliminaires demandent à être exploités de manière plus quantitative sur d'autres configurations. Cet exemple montre néanmoins la robustesse de l'approche, et sa faisabilité en configuration tridimensionnelle.

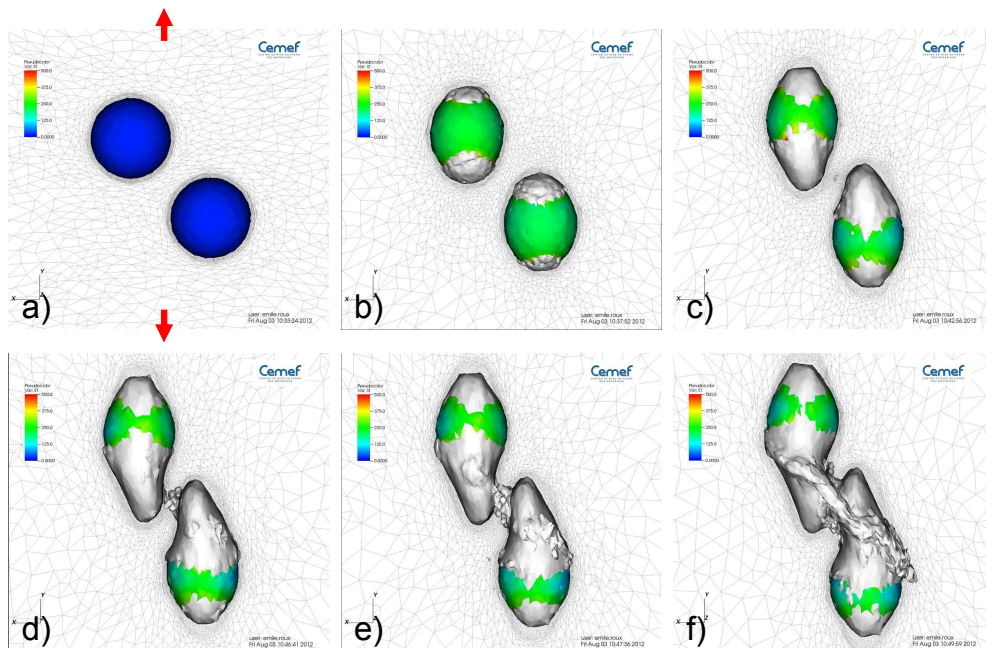


Figure 7. Croissance et coalescence de porosités dans une configuration 3D

5. Conclusion

Une approche originale, basée sur la représentation de la microstructure inclusionnaire par des fonctions level-set et une adaptation anisotrope du maillage, permet de modéliser les phases de germination, de croissance et de coalescence caractérisant l'endommagement ductile des métaux. Cette méthodologie permet notamment d'étudier la compétition entre fragmentation d'inclusion ou décohésion à l'interface inclusion-matrice pour différents types de chargement. Elle permet également de montrer le rôle prépondérant des inclusions et du type de chargement lors de la phase de croissance des porosités.

Ces résultats préliminaires visent à démontrer la faisabilité numérique ainsi que la grande robustesse de l'approche numérique développée. Ces résultats doivent maintenant être enrichis de manière à caractériser les phases de germination, croissance et coalescence de manière plus quantitative. A terme, cette approche micromécanique pourra être utilisée pour calibrer les modèles de type Gurson-Tvergaard-Needleman pour des trajets de chargement complexes.

6. Références

- [1] Y. Bai and T. Wierzbicki. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*, 24(6), 1071 – 1096, 2008.
- [2] I. Barsoum and J. Faleskog. Rupture mechanisms in combined tension and shear–Micromechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 44(17), 5481 – 5498, 2007.
- [3] M. Dunand, D. Mohr, On the predictive capabilities of the shear modified Gurson and the modified Mohr–Coulomb fracture models over a wide range of stress triaxialities and Lode angles, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(7), 1374 – 1394, 2011.
- [4] S. Thuillier, E. Maire, M. Brunet, Ductile damage in aluminium alloy thin sheets: Correlation between micro-tomography observations and mechanical modelling, *Materials Science and Engineering: A*, 558(15), 217 – 225, 2012.
- [5] A.A. Benzerga, D. Surovik, S.M. Keralavarma, On the path-dependence of the fracture locus in ductile materials – Analysis, *International Journal of Plasticity*, 37, 157 – 170, 2012.
- [6] R. E Khaoulani and P.-O. Bouchard, An anisotropic mesh adaptation strategy for damage and failure in ductile materials, *Finite Elements in Analysis and Design*, 59, 1-10, 2012.
- [7] E. Roux, M. Bernacki and 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.
- [8] T. Coupez, H. Dignonnet, R. Ducloux, Parallel meshing and remeshing by repartitioning, *Appl. Math. Model.* 25, 153-175, 2000.
- [9] Y. Mesri, W. Zerguine, H. Dignonnet, L. Silva, T. Coupez, Dynamic Parallel Adaption for Three Dimensional Unstructured Meshes: Application to Interface Tracking, *Proceedings of the 17th International Meshing Roundtable* (2008).