

# ETUDE DE LA RUPTURE DUCTILE PAR HOMOGENEISATION NUMERIQUE DE MATERIAUX AVEC UNE REPARTITION ALEATOIRE DE DEFAUTS

Clément Cadet <sup>a, b</sup>, Jacques Besson <sup>a</sup>, Sylvain Flouriot <sup>b</sup>, Samuel Forest <sup>a</sup>, Pierre Kerfriden <sup>a</sup>, Victor de Rancourt <sup>b</sup>

<sup>a</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, MAT - Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry, France, clement.cadet@mines-paristech.fr, jacques.besson@mines-paristech.fr samuel.forest@mines-paristech.fr, pierre.kerfriden@mines-paristech.fr ; <sup>b</sup>CEA Valduc, Is-sur-Tille, France, sylvain.flouriot@cea.fr, victor.derancourt@cea.fr

**Mots-clés :** Plasticité, Défauts, Rupture ductile, Volume élémentaire représentatif, Éléments finis, Approche statistique

## Résumé

*La prévision de la transition entre croissance et coalescence dans le cadre de la rupture ductile reste un problème ouvert. Ce travail se propose d'étudier cette transition en considérant explicitement les interactions d'une populations de défauts sphériques répartis aléatoirement dans une matrice élastique - parfaitement plastique. Le comportement d'un volume élémentaire représentatif est calculé par éléments finis en grandes déformations. Le présent article montre que le modèle de VER proposé permet de représenter correctement l'apparition de la coalescence. Cette méthodologie permet d'étendre la stratégie d'homogénéisation numérique proposée par [1] à la rupture ductile en grandes déformations*

## 1 Introduction

Lors d'un soudage, des pores peuvent apparaître au sein du matériau. Pour prévoir la résistance de l'assemblage soudé à un chargement monotone, il faut donc comprendre l'effet de la présence de ces défauts sur le comportement en rupture ductile du matériau. La rupture ductile se déroule généralement en trois phases : germination de cavités, croissance et coalescence. La simulation de ce type de rupture doit donc prendre en compte ces trois phases ; or la prévision de la transition entre croissance et coalescence est encore un problème ouvert.

Plusieurs modèles théoriques essaient de prévoir cette transition ([2] par exemple) mais leurs prédictions sont généralement vérifiées par éléments finis sur des « cellules unitaires », c'est-à-dire des cellules contenant un seul défaut auxquelles sont appliquées des conditions aux limites (quasi) périodiques. Cette approche est appropriée à des porosité faibles, lorsque les défauts sont isolés. Néanmoins elle risque à plus forte porosité de sous-estimer les interactions entre défauts, notamment en contraignant les directions de localisation.

Quelques travaux ont pris en compte explicitement l'interaction entre défauts dans la transition entre croissance et coalescence mais se limitent souvent à des calculs principalement plans (exemple de [3]) ou ne considèrent que deux ou trois défauts [4]. Notons cependant la simulation complète de la rupture ductile prenant en compte une microstructure représentative avec des particules permettant la germination, effectuée par [5], mais qui reste trop coûteuse en calculs pour obtenir un modèle homogénéisé.

Dans ce travail nous cherchons à prendre en compte explicitement l'interaction de défauts répartis de manière non homogènes dans un volume élémentaire représentatif de matrice élastoplastique. Le comportement de ce volume est simulé par éléments finis en grandes déformations. Ce calcul fait apparaître un adoucissement à l'échelle de la cellule que l'on peut identifier à une coalescence. L'objectif à terme est de répéter ces calculs sur différentes réalisations de microstructures afin d'obtenir une information statistique sur le début de la coalescence. Cette étude sera effectuée en considérant différentes porosités et différentes triaxialités imposées. Il s'agit en fait d'appliquer la méthodologie de [1], utilisée initialement en analyse limite, au problème de la coalescence.

## 2 Méthodes

Le volume élémentaire représentatif (VER) sur lequel seront effectués les calculs est un cube comportant une population de défauts sphériques identiques à la répartition hétérogène. La population, pour laquelle le nombre

de défauts et la porosité à atteindre sont choisis, est générée aléatoirement selon un schéma de sphères dures (les défauts ne peuvent s'interpénétrer), en utilisant les outils développés par [9]. Si un défaut intersecte une face du cube, il est recopié sur la face opposée ; la microstructure est donc périodique à l'échelle du cube. Le volume est alors maillé par le logiciel Netgen [8] en utilisant des tétraèdres à huit nœuds, afin d'obtenir un maillage périodique (les nœuds sur des faces opposées se correspondent). Un exemple de volume maillé (porosité de 6%) est présenté en figure 1.

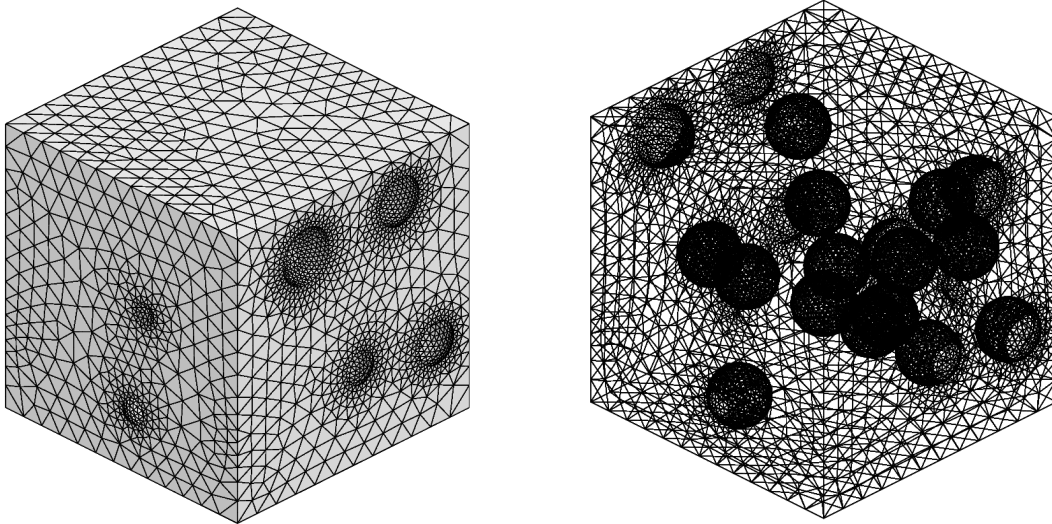


FIGURE 1: Maillage d'un VER avec une porosité de 6% (environ  $5 \times 10^5$  degrés de liberté)

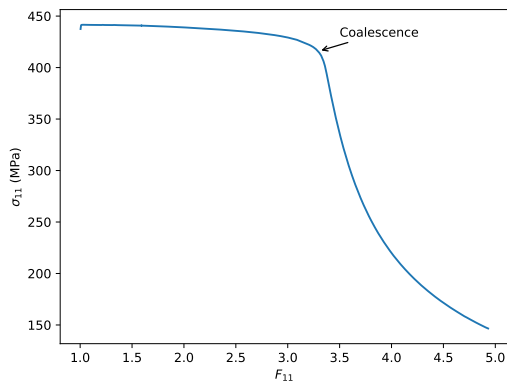
À la matrice est associé un matériau élastique ( $E = 200$  GPa,  $\nu = 0.3$ ) parfaitement plastique (selon un critère de von Mises, avec une limite d'élasticité de  $\sigma_y = 500$  MPa). Des conditions aux limites périodiques sont appliquées sur les faces du cube. Les calculs par éléments finis sont menés par le logiciel Zset [6] en grandes déformations (approche lagrangienne avec une formulation des lois de comportement utilisant la dérivée de Jaumann) en imposant la déformation moyenne du cube.

### 3 Résultats préliminaires

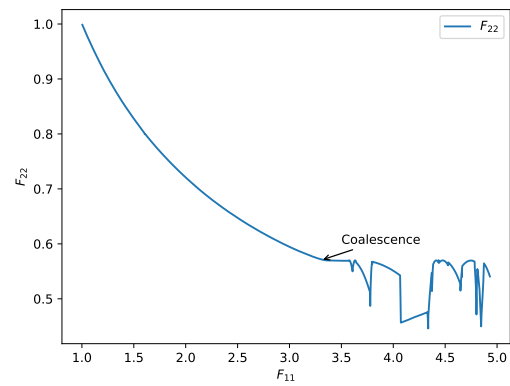
Des calculs ont d'abord été réalisés dans le cas d'une traction simple, en imposant le coefficient associé du gradient de transformation  $\mathbf{F}$ . La figure 2a présente l'évolution de la contrainte de Cauchy en fonction de la déformation  $F_{11}$  (les calculs en grandes déformations fournissent plus naturellement le premier tenseur de Piola-Kirchhoff, mais le tenseur de Cauchy peut en être déduit connaissant  $\mathbf{F}$ ). Aux alentours de  $F_{11} = 3.3$ , une chute brutale de la contrainte peut être observée. Cet événement peut être assimilé à une coalescence si l'on applique le critère de coalescence de Thomason [7] : pendant cette phase,  $F_{22}$  n'évolue quasiment plus avec  $F_{11}$ , si l'on ne tient pas compte des erreurs dues à la convergence plus difficile (fig. 2b). Lors de la coalescence, la déformation plastique se localise orthogonalement à la direction de traction dans un plan intersectant plusieurs vides (fig. 2c).

Une étude de convergence avec le maillage a été réalisée en comparant des maillages de différentes finesses (fig 3). Le phénomène de coalescence apparaît pour tous les maillages, mais intervient d'autant plus tôt que le maillage est fin. La très faible différence entre les maillages à  $5 \times 10^5$  et  $7 \times 10^5$  degrés de liberté suggère une convergence des résultats et donc d'utiliser le maillage à  $5 \times 10^5$  degrés de liberté même si un calcul sur un maillage nettement plus fin pourrait être envisagé afin de confirmer cette tendance.

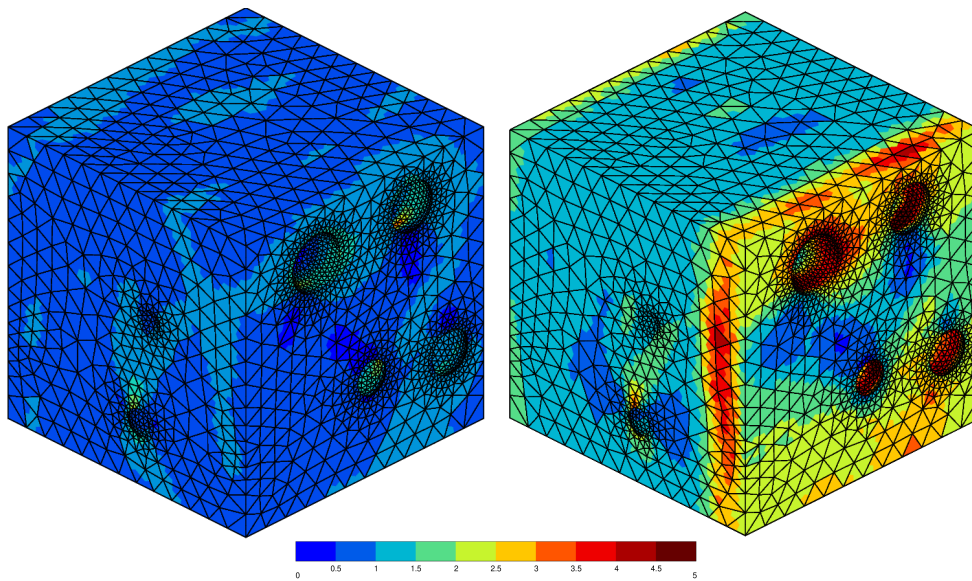
Un calcul a également été réalisé en cisaillement simple (en imposant  $\mathbf{F} = \mathbf{I} + \gamma \mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_2$ , avec les notations évidentes), et montre que le phénomène de coalescence semble se généraliser à d'autres conditions de chargement que la traction simple (fig. 4). Dans ce nouveau cas, ce phénomène a lieu sensiblement plus tôt qu'en traction simple (même s'il faudrait le vérifier sur d'autres microstructures). Le champ de déformation plastique fait apparaître une localisation sur deux plans parallèles.



(a) Courbe de traction  $\sigma_{11}-F_{11}$



(b) Détection de la coalescence selon le critère de Thomason



(c) Déformation plastique cumulée équivalente, au début de (gauche) et pendant (droite) la coalescence (champ représenté sur le maillage non déformé)

FIGURE 2: Résultats d’une simulation de traction simple sur un VER (maillage à  $5 \times 10^5$  degrés de liberté)

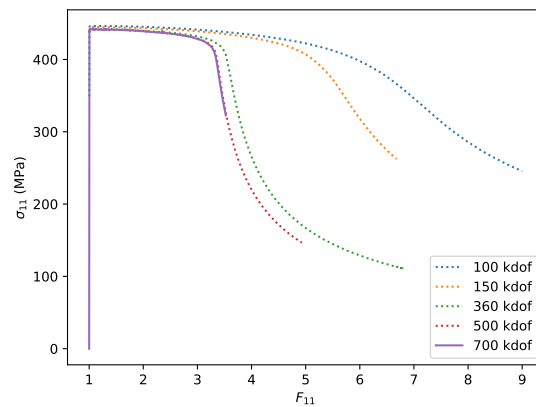


FIGURE 3: Étude de convergence avec le maillage à partir d’un calcul de traction simple

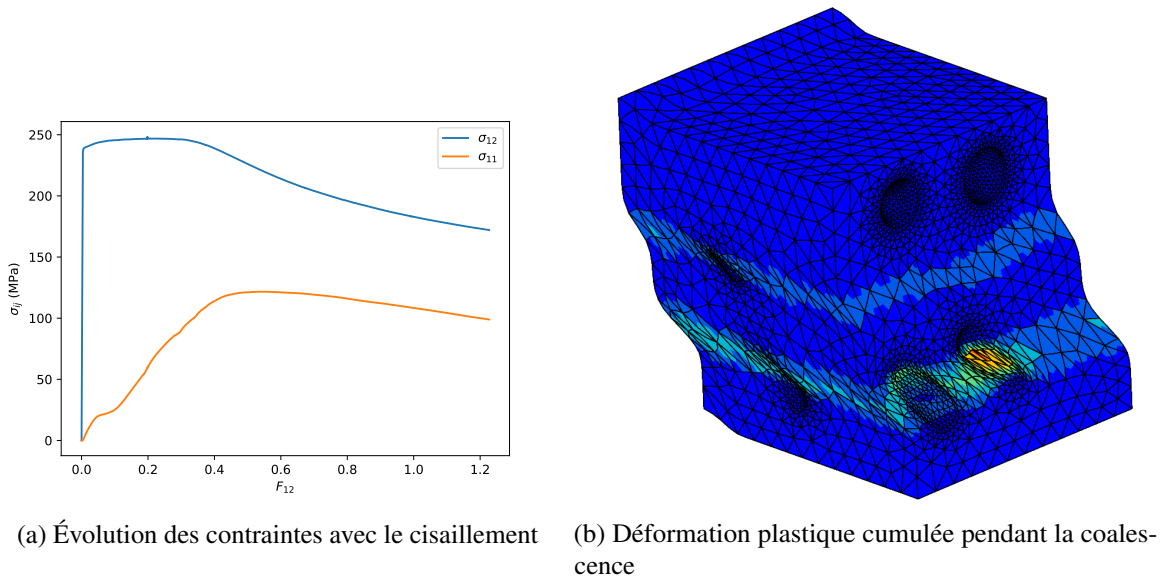


FIGURE 4: Résultats d'une simulation de glissement simple (maillage à  $5 \times 10^5$  degrés de liberté)

## 4 Perspectives

La méthodologie présentée précédemment permet donc de représenter la coalescence au sein d'un VER. Pour systématiser la détection de la coalescence, il faudrait cependant disposer d'un critère valable pour tout chargement, celui de Thomason étant principalement destiné à la traction. Par ailleurs, nous envisageons de répéter le calcul sur différentes réalisations de microstructures dans le but d'une approche statistique de la coalescence. L'étude doit ensuite considérer plusieurs porosités et conditions de chargement. Vu qu'imposer la déformation moyenne du cube ne permet pas de contrôler la triaxialité, l'application des conditions de chargement doit être modifiée, par exemple en utilisant l'élément développé par [10]. À partir de la base ainsi réalisée, un critère de début de coalescence dépendant de la porosité et de la triaxialité pourra alors être proposé.

## Références

- [1] F. Fritzen, S. Forest, T. Böhlke, D. Kondo, T. Kanit ; Computational Homogenization of Elasto-Plastic Porous Materials *International Journal of Plasticity*, 29 (2012) 102-109.
- [2] M. E. Torki, C. Tekoglu, J.-B. Leblond, et A. A. Benzerga ; Theoretical and numerical analysis of void coalescence in porous ductile solids under arbitrary loadings, *International Journal of Plasticity*, 91 (2017) 160-181.
- [3] V. Tvergaard, A. Needleman ; Three dimensional microstructural effects on plane strain ductile crack growth. *International Journal of Solids and Structures* 43 (2006) 6165–6179.
- [4] V. M. Trejo Navas, M. Bernacki, P.-O. Bouchard ; Void growth and coalescence in a three-dimensional non-periodic void cluster *International Journal of Solids and Structures* 139–140 (2018), 65–78.
- [5] M. Shakoor, M. Bernacki, P.-O. Bouchard ; Ductile fracture of a metal matrix composite studied using 3D numerical modeling of void nucleation and coalescence. *Engineering Fracture Mechanics* 189 (2018) 110–132 (2018).
- [6] Zset Package ; Non-linear material & structure analysis suite [www.zset-software.com](http://www.zset-software.com), 2013
- [7] P. F. Thomason Ductile Fracture of Metals *Pergamon Press*, 1990.
- [8] J. Schöberl NETGEN - An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules *Computing and Visualization in Science*, 1 (1997), 41-52
- [9] L. Lacourt. Étude numérique de la nocivité des défauts. *Thèse*. Université Paris Sciences et Lettres, 2019.
- [10] C. Ling, S. Forest, J. Besson, B. Tanguy, F. Latourte ; A reduced micromorphic single crystal plasticity model at finite deformations. Application to strain localization and void growth in ductile metals. *International Journal of Solids and Structures* 134 (2018) 43–69.