



Analyse multi-échelle de la refermeture de porosités, appliquée à la mise en forme des métaux à chaud

Michel Saby, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard

► To cite this version:

Michel Saby, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard. Analyse multi-échelle de la refermeture de porosités, appliquée à la mise en forme des métaux à chaud. CSMA 2013 - 11ème colloque national en calcul des structures, May 2013, Giens, France. hal-00847471

HAL Id: hal-00847471

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00847471>

Submitted on 23 Jul 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.

Analyse multi-échelle de la refermeture de porosités, appliquée à la mise en forme des métaux à chaud

Michel SABY ¹, Marc BERNACKI ¹, Pierre-Olivier BOUCHARD ¹

¹ MINES ParisTech, CEMEF Centre de Mise en Forme des Matériaux CNRS UMR 7635, michel.saby@mines-paristech.fr

Résumé — Le comportement en refermeture de porosités est étudié par éléments finis, à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif. Les maillages sont générés à partir de géométries réelles de porosités obtenues par tomographie aux rayons X. Les simulations sont réalisées avec des conditions aux limites représentatives des conditions industrielles réelles. Il est démontré que l'état de contraintes présente une influence de premier ordre sur le comportement en refermeture, devant d'autres paramètres mécaniques. L'impact de la géométrie de la porosité est également étudié via la génération de géométries équivalentes représentatives. Celle-ci présente également une influence de premier ordre sur le comportement en refermeture.

Mots clés — porosité, éléments finis, volume élémentaire représentatif, tomographie, déformation plastique

1 Introduction

La production de pièces métalliques de grandes dimensions pour l'industrie aéronautique, de l'énergie ou du transport est en constante augmentation. Durant les premières étapes d'élaboration de pièces métalliques de grandes dimensions, des porosités peuvent apparaître. Leur élimination est naturellement requise afin de produire des pièces saines. Cette élimination est réalisée durant les procédés de mise en forme à chaud de ces pièces, induisant dans la matière de forts taux de déformation. L'optimisation de ces procédés en terme de refermeture de porosité reste actuellement de première importance industriellement. Pour étudier et prédire cette refermeture, deux approches principales sont présentées dans la littérature : (i) l'approche micro-analytique [1, 6] dans laquelle l'évolution d'une porosité isolée dans un substrat infini est prédite selon certaines hypothèses, généralement assez éloignées des conditions industrielles ; et (ii) l'approche macroscopique [3, 2] dans laquelle un procédé donné est décrit de façon explicite, contenant une porosité initiale, donnant accès à des résultats directement dépendants du procédé considéré.

Une approche de type mésoscopique est présentée ici, inspirée par les travaux présentés en [5] et [6]. La refermeture de porosités est étudiée par éléments finis à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif (VER), respectant des conditions thermo-mécaniques macroscopiques imposées par des conditions aux limites. Cette approche rend possible une description très précise de la porosité et de son comportement dans des conditions représentatives de conditions industrielles. Le volume de porosité est étudié en fonction de paramètres mécaniques et morphologiques afin d'identifier les paramètres majeurs qui contrôlent la refermeture.

2 Description du VER

La refermeture de porosité est contrôlée par l'état thermo-mécanique local de la matière dans une pièce. Cet état est donc tout d'abord examiné par simulation éléments-finis des procédés industriels considérés à l'échelle macroscopique, sans présence de porosité interne, au moyen du code FORGE2011[®]. Les variables mécaniques prises en compte sont les tenseurs de contrainte et de déformation pour un point du maillage (capteur) défini de façon lagrangienne. La position de ce point a été choisie de façon à représenter la position typique des porosités selon les observations historiques des gammes industrielles.

Toutes les études de la littérature mettent en évidence le fait que l'état de contrainte a un impact direct sur le taux de refermeture. Cet état de contraintes est représenté par le taux de triaxialité des contraintes $T_X = \frac{\sigma_m}{\sigma_e}$, avec $\sigma_m = \frac{1}{3}\text{tr}(\boldsymbol{\sigma})$ la contrainte moyenne, et $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\sigma}}$ la contrainte équivalente de von Mises. La déformation équivalente est exprimée par $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{\epsilon} : \boldsymbol{\epsilon}}$.

Des conditions aux limites sont appliquées sur le VER de façon à représenter les trajets de chargement identifiés. Le VER est piloté en vitesse de déplacement selon son axe z , et en contrainte normale selon ses axes x et y , comme le montre la Fig. 1. De cette façon la vitesse de déformation est maîtrisée, et le taux de triaxialité des contraintes est imposé en conséquence par les contraintes sur les axes perpendiculaires. Les plans (Oxy) , (Oyz) and (Ozx) sont définis comme plans de symétrie. Les dimensions du VER sont notés D_1 , D_2 et D_3 .

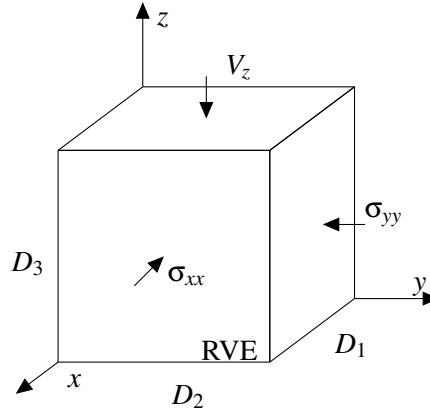


Fig. 1 – Volume élémentaire représentatif

L'évolution du taux de triaxialité des contraintes en fonction de la déformation équivalente est mesurée dans le VER, puis elle est comparée à celle mesurée dans le procédé industriel en Fig. 2. La figure montre que, mis à part un léger écart pour les valeurs de déformation très élevées, les conditions mécaniques imposées à la porosité dans le VER sont fidèles à celles que subirait la porosité dans le procédé réel.

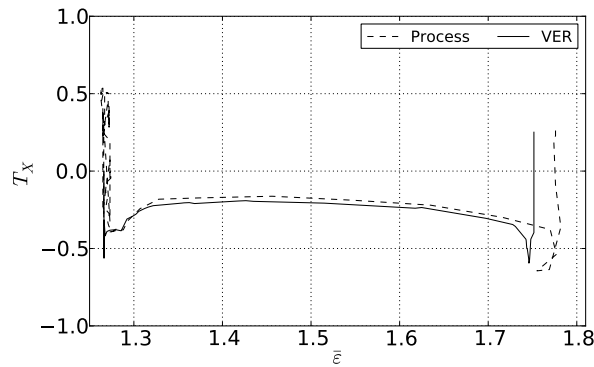


Fig. 2 – Mesure du taux de triaxialité des contraintes dans le procédé réel et celui imposé dans le VER

Le maillage initial du VER est généré à partir d'images tridimensionnelles de porosités réelles, obtenues par tomographie aux rayons X. La génération de la surface interne de la porosité est obtenue par l'algorithme de seuillage des Marching Cubes [4]. La position des noeuds du maillage surfacique obtenu est donc périodique, et directement déterminée par la taille de voxel de l'image tridimensionnelle utilisée. Elle est de 0.128mm dans le cas présenté dans la Fig. 3. Un maillage volumique non-structuré est généré entre la surface interne, et les faces extérieures du VER.

La géométrie initiale d'une porosité peut également être représentée par une ellipsoïde équivalente calculée à partir de sa matrice d'inertie. Cette matrice est calculée à partir de l'image tridimensionnelle initiale, par :

$$MI = \begin{pmatrix} I_{ox} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{oy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{oz} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} I_{ox} &= \sum m_i (y_i^2 + z_i^2) & I_{xy} &= \sum m_i (x_i \cdot y_i) \\ I_{oy} &= \sum m_i (x_i^2 + z_i^2) & I_{yz} &= \sum m_i (y_i \cdot z_i) \\ I_{oz} &= \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) & I_{xz} &= \sum m_i (x_i \cdot z_i) \end{aligned} \quad (1)$$

Pour chaque terme, la somme est réalisée sur l'ensemble des voxels de l'image, et $m_i = 1$ si le i^{eme} voxel appartient à la porosité, $m_i = 0$ sinon. La matrice obtenue permet donc de générer, pour une porosité réelle, une ellipsoïde équivalente dont la matrice d'inertie est parfaitement identique. Cette méthode présente l'avantage de respecter les facteurs de forme, les orientations principales, ainsi que le volume interne de la porosité initiale, et permet de quantifier la morphologie de la porosité.

La loi de comportement utilisée est de type visco-plastique, typique pour les aciers à la température des procédés considérés. En réalité, la température mesurée dans le procédé reste localement quasiment constante dans la zone d'intérêt, et est fixée constante dans le VER.

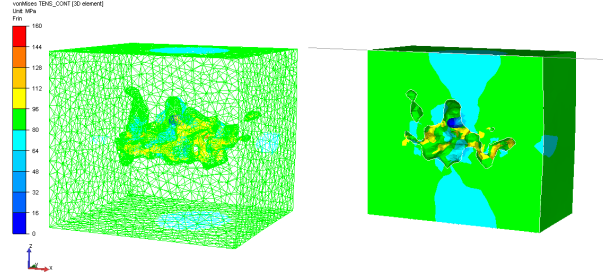


Fig. 3 – Maillage déformé du VER contenant une porosité réelle

3 Etude de convergence numérique

3.1 Taille de maille

La topologie de la surface interne n'est pas modifiée durant le calcul. Seule la position des nœuds est actualisée par transport de champ lagrangien. La taille de maille interne h_{min} est donc déterminée par la taille de voxel, soit $h_{min} = 0.128mm$. Une taille de maille plus grossière $h_{max} = 1mm$ est définie sur le bord extérieur du VER de façon à réduire le nombre d'éléments et le temps de calcul. Une étude de sensibilité à h_{min} a été réalisée et les résultats sont résumés dans la Fig. 4(a). Le graphe montre que le raffinement du maillage a un impact non-négligeable sur l'évolution du volume de la porosité. La définition d'une taille de maille trop grossière autour de la porosité entraîne une certaine erreur sur le volume. Ce phénomène s'explique par la présence de fortes fluctuations des champs mécaniques dans l'environnement proche de la porosité, augmentant l'erreur de discrétisation du maillage dans ces zones. Naturellement, le temps de calcul augmente significativement avec le raffinement du maillage. La valeur $h_{min} = 0.1mm$ semble être une valeur raisonnable, car étant un bon compromis entre l'erreur commise et le temps de calcul total, et sera utilisée pour le reste de l'étude.

3.2 Dimensions du VER

Afin de réduire les temps de calcul, les dimensions D_i du VER ont également été l'objet d'une étude de sensibilité. Les dimensions du VER sont définies par rapport aux dimensions de la porosité par $D_i = n \times d_i$, où n est un entier, et d_i les dimensions de la porosité dans chaque direction $i = \{x, y, z\}$. L'étude de sensibilité à h_{min} a été répétée pour différentes valeurs de $n = \{2, 3, 4, 5\}$. L'étude a montré que la convergence est systématiquement obtenue pour une valeur $h_{min} \leq 0.1mm$. L'évolution du volume de porosité pour $h_{min} = 0.1mm$ est donnée dans la Fig. 4(b) pour différentes valeurs de n . La figure montre que l'utilisation d'un VER avec $n = 2$ induit un écart final de l'ordre de 8% par rapport à la valeur finale obtenue avec $n = 5$. Cet écart est dû aux effets de bords qui apparaissent lorsque la porosité est trop proche des bords du VER. Les champs mécaniques sont localement modifiés par la présence d'une condition aux limites. La figure montre que le volume obtenu avec $n = 3$ induit une erreur finale

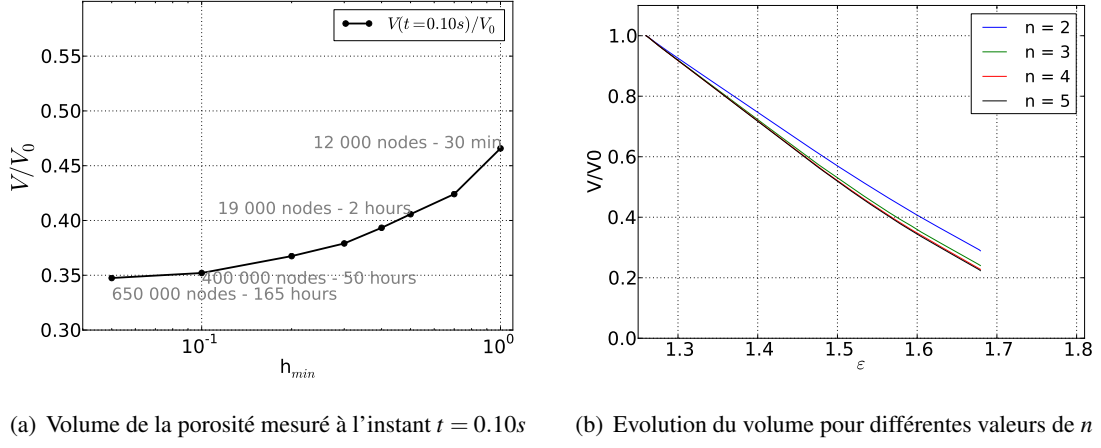


Fig. 4 – Etude de convergence au maillage

inférieure à 1.5% par rapport au volume final obtenu avec $n = 5$. Cette valeur est acceptable et l'étude est donc menée avec une dimension de VER déterminée par $n = 3$.

3.3 Pas de temps

Lorsque les conditions aux limites imposent de fortes déformations, le volume de la porosité varie fortement et le pas de temps peut également avoir besoin d'être raffiné. Le pas de temps est dans ce cas raffiné de façon à ne pas dépasser une variation relative de volume supérieure à 10^{-3} par incrément.

4 Etude de sensibilité au chargement mécanique

4.1 Vitesse de déformation

Etant donnée la loi de comportement visco-plastique du matériau utilisée, la contrainte d'écoulement varie avec la vitesse de déformation. Le comportement en refermeture de porosité peut donc a priori présenter une dépendance en vitesse de déformation. L'évolution du volume a été mesurée pour plusieurs vitesses de déformation $\dot{\epsilon}$ variant de 0.001/s à 100/s. La contrainte d'écoulement varie de 24 MPa à 140 MPa sur cette plage de valeurs, et les conditions aux limites en contrainte sont ajustées de façon à respecter le taux de triaxialité souhaité. Les évolutions du volume sont tracées dans la Fig. 5. La vitesse de déformation a une influence négligeable sur le comportement de la porosité. La triaxialité présente cependant une influence de premier ordre, ce qui est en très bon accord avec la littérature [1, 3, 6].

4.2 Triaxialité des contraintes

L'évolution du volume de la porosité ellipsoïdale équivalente est étudiée dans cette section. Ses dimensions, son orientation et son volume sont donc identiques à ceux de la porosité réelle. Les géométries initiales sont illustrées dans la Fig 6. L'évolution de la porosité ellipsoïdale est tracée pour plusieurs valeurs de triaxialité dans la Fig. 7. Les valeurs mesurées dans le VER sont représentées par des points, et une interpolation quadratique est calculée pour chaque valeur de triaxialité. Elle s'exprime sous la forme :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + b\bar{\epsilon} + c\bar{\epsilon}^2, \quad (2)$$

avec $[b, c]$ un jeu de constantes mesuré pour chaque valeur de triaxialité des contraintes. Cette expression peut être linéarisée sous la forme :

$$\frac{1}{\bar{\epsilon}} \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right) = b + c\bar{\epsilon}. \quad (3)$$

La partie droite de la Fig. 7 présente les résultats sous la forme linéarisée. Cette figure démontre, par la linéarité de l'évolution des volumes mesurés, la pertinence de la forme polynômiale choisie. Ce résultat est en bon accord avec les résultats obtenus dans la littérature obtenus pour des porosités sphériques [6].

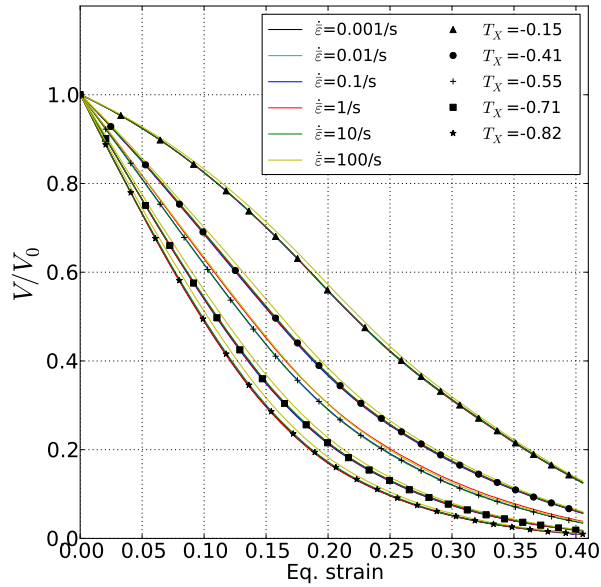
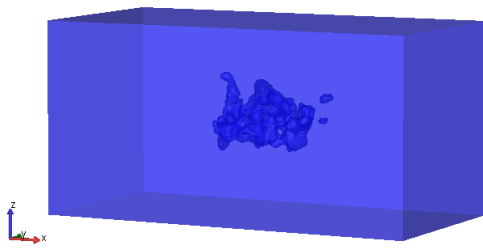
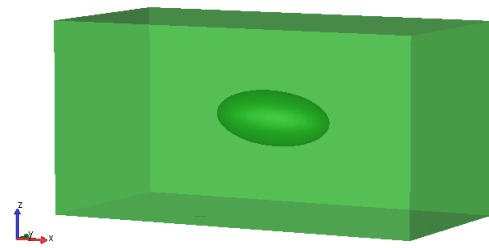


Fig. 5 – Evolution du volume de la porosité réelle pour différentes valeurs de vitesses de déformation et taux de triaxialité



(a) Porosité réelle



(b) Ellipsoïde équivalente

Fig. 6 – Maillages initiaux utilisés pour l'étude de sensibilité à la triaxialité des contraintes

Les valeurs des constantes b et c peuvent donc être mesurées par régression linéaire. Cette étape est réalisée sur la partie linéaire du graphe. Les bornes inférieure et supérieure utilisées pour la régression sont représentées par un point noir et un carré noir, respectivement.

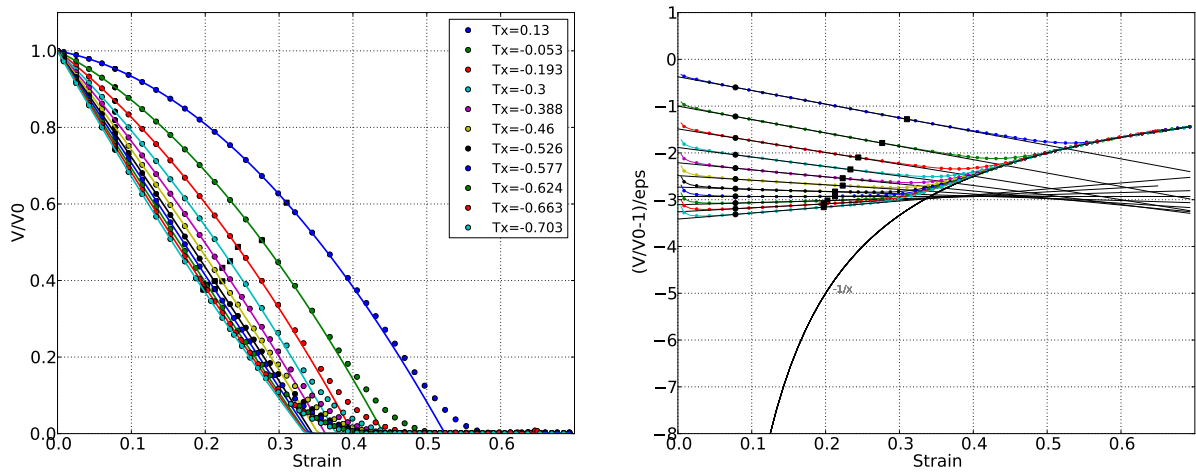


Fig. 7 – Evolution du volume de la porosité ellipsoïdale pour différents taux de triaxialité

Afin de prédire l'évolution de cette porosité ellipsoïdale pour toute valeur de triaxialité, les valeurs

de b et c sont étudiées en fonction du taux de triaxialité des contraintes. L'évolution du coefficient b est approchée par une fonction analytique $b(T_X)$, et l'évolution de c par une fonction $c(T_X)$. L'expression de ces fonctions n'est pas détaillée dans ce document pour des raisons de confidentialité des travaux en cours. Le volume s'exprime donc sous la forme :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + b(T_X)\bar{\epsilon} + c(T_X)\bar{\epsilon}^2. \quad (4)$$

La prédiction du volume par le modèle est calculée pour tous les taux de triaxialité testés, et superposée aux valeurs mesurées dans le VER dans la Fig. 8, ainsi que l'écart entre ces deux valeurs, à droite. La figure montre que le modèle prédit l'évolution du volume avec un excellent accord, puisque l'écart mesuré est inférieur à 1% jusqu'à $V/V_0 = 0.2$. Le modèle surestime ensuite très légèrement la refermeture dans son comportement final. Cet écart, restant inférieur à 8%, peut être attribué à un changement de comportement de la porosité sur la fin de la refermeture, dû à la présence de contact sur les bords de la porosité quasiment refermée.

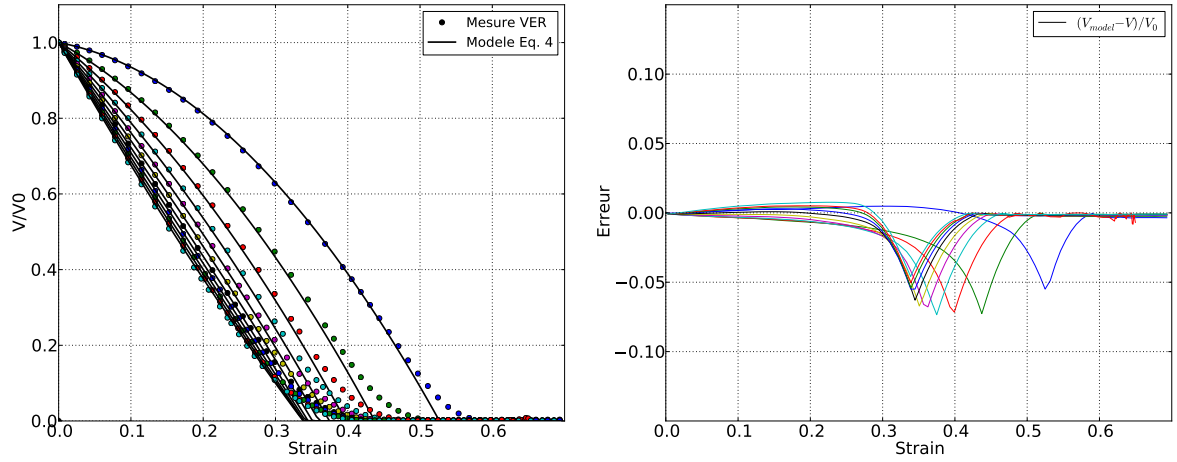


Fig. 8 – Comparaison de la refermeture prédite par le modèle de l'Eq. 4 et les valeurs mesurées dans le VER

5 Etude de sensibilité aux paramètres morphologiques

La calibration du modèle Eq. 4 a été réalisée à partir d'une ellipsoïde dont la géométrie initiale est une donnée expérimentale issue d'observations. Ses dimensions et son orientation ont donc des valeurs particulières dont l'impact n'est pas a priori négligeable sur les expressions de b et c . Une étude de sensibilité est donc réalisée quant à la morphologie de la porosité, plus particulièrement son orientation par rapport à la direction principale d'écrasement $\vec{V}_Z$. L'orientation de la porosité est définie par deux angles $\alpha_1 = (\vec{u}_3, \vec{V}_Z)$ et $\alpha_2 = (\vec{u}_2, \vec{V}_Z)$, avec $\vec{u}_i$ la i^{eme} direction du repère principal issu de la diagonalisation de la matrice d'inertie. Le vecteur $\vec{u}_3$ correspond à la direction autour de laquelle la porosité possède le plus faible moment d'inertie. La porosité est donc allongée dans la direction $\vec{u}_3$. A l'inverse, la direction $\vec{u}_1$ correspond à celle autour de laquelle le moment d'inertie est le plus fort, donc la dimension de la porosité dans la direction $\vec{u}_1$ est la plus faible. La dimension dans la direction $\vec{u}_2$ est comprise entre les deux dimensions précédentes.

Pour une valeur constante de $\alpha_2 = 90^\circ$, l'angle α_1 varie de 0 à 90° , et les coefficients b et c sont étudiés en fonction de l'angle α_1 . De façon analogue, pour une valeur constante de $\alpha_1 = 90^\circ$, l'angle α_2 varie de 0 à 90° . Les calculs montrent que le taux de refermeture initial est le plus élevé lorsque $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$. Cette configuration correspond à une ellipsoïde dont l'axe principal d'inertie $\vec{u}_1$ (donc sa dimension la plus faible) est colinéaire à la direction d'écrasement principal. Cette configuration favorise donc la refermeture. A l'opposé, le cas $\alpha_1 = 0^\circ$ correspond donc au cas où la plus grande dimension de la porosité est colinéaire à la direction principale d'écrasement, donc sa refermeture est la moins favorable, comme le montre le tracé en points noirs de la Fig. 9. Le cas $\alpha_2 = 0^\circ$ correspond donc au cas où la

seconde dimension de la porosité est colinéaire à la direction principale d'écrasement, donc la pente de la courbe (points noirs de la Fig. 10) est comprise entre les deux cas précédents. Les valeurs de b et c sont calculées pour chaque courbe et sont étudiées en fonction de chaque angle α_1 et α_2 . Elles sont approchées par des fonctions analytiques $b_1(\alpha_1)$ et $b_2(\alpha_2)$, ainsi que $c_1(\alpha_1)$ et $c_2(\alpha_2)$. Ces fonctions ne sont pas détaillées dans ce document pour des raisons de confidentialité.

Les expressions $b_1(\alpha_1)$ et $c_1(\alpha_1)$ sont injectées dans le modèle polynomial donné en Eq. 2 pour obtenir un modèle valable pour tout α_1 (à α_2 fixé) :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + b_1(\alpha_1)\bar{\epsilon} + c_1(\alpha_1)\bar{\epsilon}^2, \quad (5)$$

et les expressions $b_2(\alpha_2)$ et $c_2(\alpha_2)$ pour obtenir un modèle valable pour tout α_2 (à α_1 fixé) :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + b_2(\alpha_2)\bar{\epsilon} + 1 + c_2(\alpha_2)\bar{\epsilon}^2. \quad (6)$$

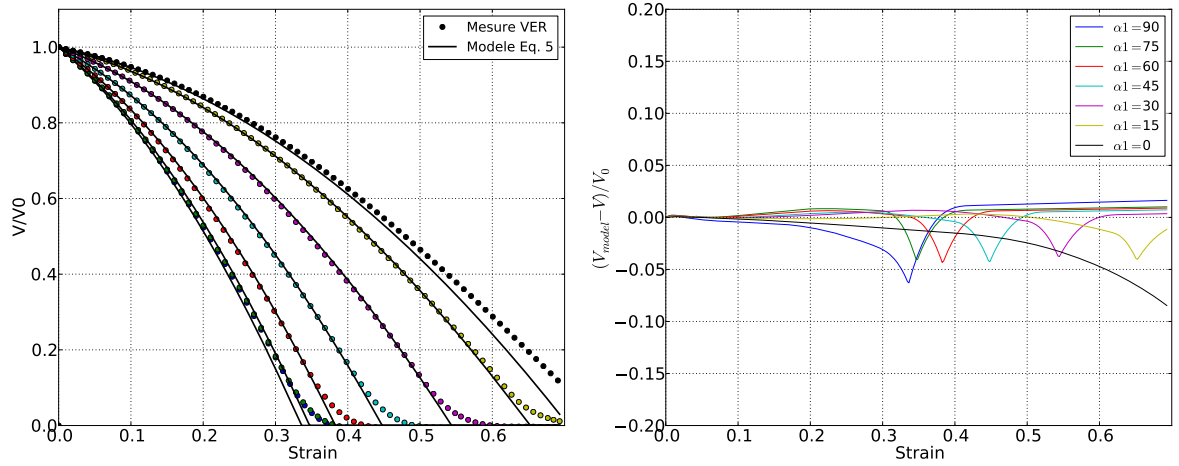


Fig. 9 – Comparaison de la refermeture prédite par le modèle de l'Eq. 5 et les valeurs mesurées dans le VER pour $\alpha_2 = 90^\circ$

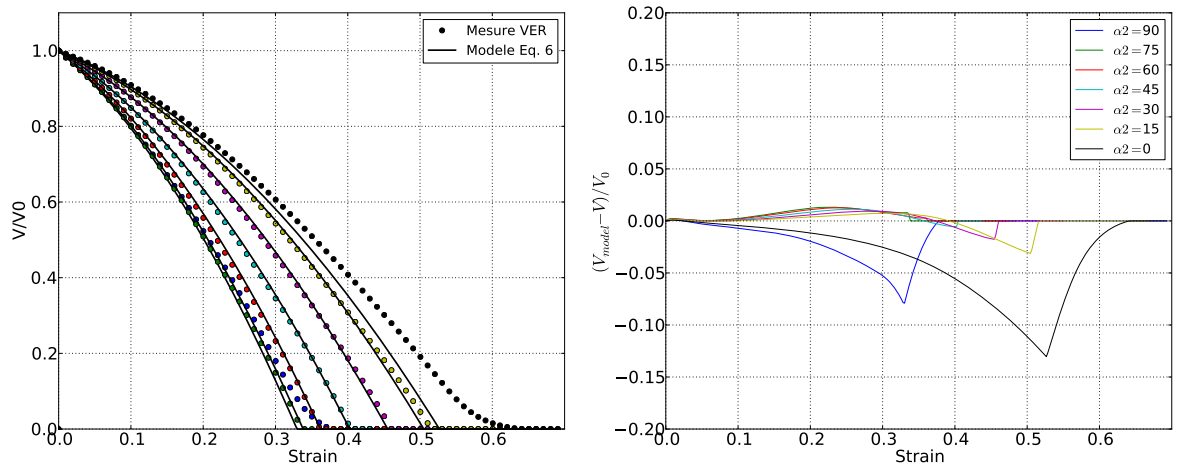


Fig. 10 – Comparaison de la refermeture prédite par le modèle de l'Eq. 6 et les valeurs mesurées dans le VER pour $\alpha_1 = 90^\circ$

Les valeurs obtenues par les Eq. 5 et 6 sont tracées dans les Figs. 9 et 10 respectivement. Un excellent accord est obtenu entre le modèle et le calcul. Les écarts obtenus sont dans l'ensemble très faibles, restant sous le seuil de 5% d'écart relatif. La surestimation de la refermeture est la plus élevée pour les angles les plus extrêmes, mais reste toutefois inférieure à 13%.

6 Conclusion

Une approche mésoscopique a été implémentée afin d'étudier le comportement en refermeture de plusieurs porosités, et dans des conditions mécaniques contrôlées. La méthode permet d'imposer un trajet de chargement mécanique réel à l'échelle d'un volume représentatif. Des images tridimensionnelles obtenues en tomographie ont été utilisées pour générer un VER contenant une morphologie réelle, ainsi que pour générer une ellipsoïde équivalente.

Une étude de sensibilité au chargement mécanique a montré que la vitesse de déformation n'avait pas d'influence sur la refermeture de porosité, malgré le caractère visco-plastique du matériau utilisé. La triaxialité joue un rôle majeur sur le comportement en refermeture. Le comportement en refermeture suit une évolution de type polynômial dont les coefficients sont approchés par une expression analytique du taux de triaxialité des contraintes. Le modèle donne une très bonne prédiction de la refermeture de la porosité.

Une étude de sensibilité à l'orientation d'une porosité ellipsoïdale a permis de quantifier la dépendance de la refermeture par rapport aux deux angles d'orientation principaux de la porosité. La prédiction du volume de la porosité donne également un très bon accord avec les mesures obtenues par le calcul.

Par la suite, l'étude pourra être approfondie de façon à proposer un modèle capable de prédire le volume pour une orientation quelconque, et de quantifier les influences croisées avec triaxialité des contraintes. L'influence des dimensions de la porosité pourra également être quantifiée, car celle-ci doit a priori avoir un impact non-négligeable sur la dépendance à l'orientation.

7 Remerciements

Les auteurs remercient *Timet Savoie*, ainsi que *Aubert&Duval*, *Ascometal Creas*, *Constellium*, *Creusot Forge (groupe Areva)* et *Industeel (ArcelorMittal)* pour le financement de ces travaux.

Références

- [1] B. Budiansky, J.W. Hutchinson, S. Slutsky. *Void growth and collapse in viscous solids*, Mechanics of Solids, Pergamon Press, Oxford, 13–45, 1982
- [2] K. Chen, Y. Yang, G. Shao, K. Liu. *Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot*, Computational Materials Science, 51(1) :72–77, 2012
- [3] M.S. Chun, C.J. Van Tyne, Y.H. Moon. *FEM analysis of void closure behaviour during open die forging of rectangular billets*, Steel Research International, 77 :116–121, 2006
- [4] D.A. Rajon, W.E. Bolch. *Marching cube algorithm : Review and trilinear interpolation adaptation for image-based dosimetric models*, Comput. Med. Imaging Graph., 27 :411–435, 2003
- [5] X. Yin, W. Chen, A. To, C. McVeigh, W.K. Liu. *Statistical volume element method for predicting microstructure-constitutive property relations*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197 :3516–3529, 2008
- [6] X.X. Zhang, Z.S. Cui. *Theoretical study of void closure in nonlinear plastic materials*, Applied Mathematics and Mechanics - English Edition, 30(5) :631–642, 2009