

Effet du trajet de chargement sur la déformation à rupture de matériaux métalliques

V. LAFILÉ^a, V. GROLLEAU^a, L. MAHEO^a, B. GALPIN^a, A. PENIN^a

a. Univ. Bretagne Sud (UBS), CNRS FRE 3744, IRDL, F-56100, Lorient, FRANCE

Résumé :

La simulation numérique par éléments finis est devenue un outil de développement incontournable lors de l'élaboration de nouveaux systèmes technologiques dont on veut prédire le comportement élastique, plastique ou à la rupture, quel que soit le chargement appliqué. Dans le cas du modèle de rupture Mohr-Coulomb modifié (MMC), il est nécessaire de définir une cartographie des déformations à ruptures en fonction de l'angle de Lode et de la triaxialité. Ces déformations sont obtenues par différents essais mécaniques qui doivent assurer un trajet de chargement à angle de Lode et triaxialité quasi-constants. Afin de tester la robustesse de ce modèle de rupture, il peut être intéressant de confronter ses prédictions à des essais mécaniques à trajets de chargements complexes conduisant à la rupture. On se propose alors d'étudier un trajet de chargement non-proportionnel sur deux types de matériaux : un aluminium AA2024T3 et un acier DP450. Ce trajet de chargement est constitué d'une traction simple suivie d'un chargement à état de contrainte équilibaxiale en tension ou d'un état de tension à déformation plane. Deux niveaux de déformation ont été réalisés en traction simple afin d'étudier l'influence du niveau de la prédéformation. Les déformations à rupture mesurées pour ces essais sont comparées aux déformations à rupture obtenues pour chaque trajet de chargement monotone de traction simple et traction biaxiale constituant ces chargements complexes. Ces informations constituent une base de données pour le modèle de rupture MMC.

Abstract :

Finite elements calculation has become an unavoidable tool for technological design and prediction of elastic, plastic and failure behavior of materials and structures. To calibrate the Modified Mohr-Coulomb (MMC) failure model, the mapping of failure strain as a function of Lode angle and triaxiality is compulsory. These values are obtained thanks to various mechanical tests with proportional loading paths and keeping stress triaxiality and Lode angle as constant as possible. The failure model efficiency is compared with experimental mechanical tests of non-proportional loading paths. In this study, a particular loading path is tested on two materials : aluminum AA-2024-T3 and steel DP450. This loading path is composed of uniaxial tension followed by equi-biaxial tension or plane strain tension. Tests are conducted at two strain levels for each material. Failure strains of each loading path (proportional and non-proportional) are compared to each other.

Mots clefs : trajet de chargement, modèle de rupture, Mohr-Coulomb modifié, aluminium AA-2024-T3, acier DP450

1 Introduction

La modélisation de la rupture des matériaux ductiles est d'une importance majeure pour les problématiques de mise en forme des matériaux et de simulation d'impact entraînant de grandes déformations ([1]). Il existe des modèles plus ou moins complexes pour prédire la rupture des matériaux ([2]), et leur calibration nécessite toujours de passer par la détermination de résultats expérimentaux. La recherche de géométrie d'éprouvettes et de méthodes d'essais permettant d'appliquer des trajets de chargement stables jusqu'à la rupture est au coeur de ce travail ([3], [4], [5]). Dans cette étude, une série d'essais menés jusqu'à rupture et appliqués à un acier DP450 et un aluminium AA-2024-T3 est proposée. Les valeurs de déformation à rupture d'essais à chargement proportionnel serviront à étayer le choix du modèle de rupture de Mohr-Coulomb modifié ([6]) pour prédire la ruine des matériaux. Les résultats des essais de trajets de chargements non-proportionnels seront comparés à ceux des essais de chargements proportionnels.

2 État de chargement

2.1 Caractérisation de l'état de contrainte

L'état de contrainte à l'intérieur d'un matériaux sollicité par un chargement mécanique peut-être défini par la triaxialité, η , et le paramètre d'angle de Lode $\bar{\theta}$. Ces grandeurs sont calculées à partir des invariants du tenseur des contraintes $[\sigma]$ ou de son déviateur $[\mathbf{S}]$. Le premier invariant, $I_1 = \text{tr}([\sigma])$, permet de définir la contrainte hydrostatique $\sigma_m = \frac{1}{3}I_1$. Le second invariant, $J_2 = \frac{1}{2}\mathbf{S} : \mathbf{S}$, permet le calcul de la contrainte équivalente de von Mises $\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2}$. Le troisième invariant, $J_3 = \det(\mathbf{S})$, sert quant à lui à définir le troisième invariant normalisé $\xi = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}}$.

La triaxialité et le paramètre de Lode sont calculés à partir des équations suivantes :

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos(\xi) \quad (2)$$

Dans le cas d'états de contraintes planes, η et $\bar{\theta}$ sont liés par la relation :

$$\cos\left(\frac{\pi}{2}(1 - \bar{\theta})\right) = -\frac{27}{2}\eta\left(\eta^2 - \frac{1}{3}\right) \quad (3)$$

qui est représentée sur la figure 1.

2.2 Chargements proportionnels simples

Pour caractériser la rupture d'un matériau, il faut effectuer des essais à chargement proportionnel dont l'état de contrainte est connu. Lors d'un chargement proportionnel, la triaxialité et le paramètre de Lode restent constants tout au long de l'essai. Dans cette étude nous avons donc en premier lieu recherché les valeurs de déformation à rupture pour deux états de contrainte qui sont la traction uniaxiale et la traction équilibaxiale. Ces états de contraintes sont signalés sur la figure 1 par les points noirs. Ces résultats serviront en partie à calibrer le modèle de Mohr-Coulomb modifié, ils seront complétés par la suite par des résultats en cisaillement et en traction à déformation plane afin de définir complètement les paramètres du modèle MMC.

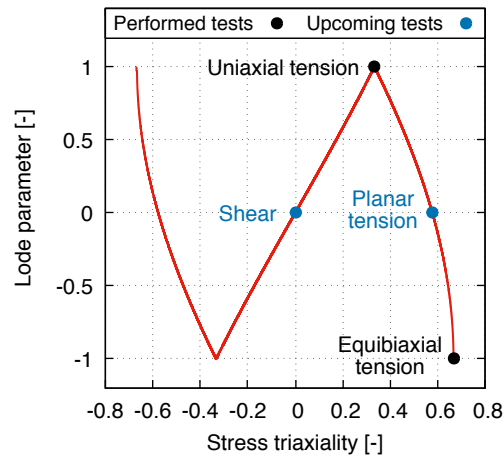


FIGURE 1 – Courbe de relation entre η et $\bar{\theta}$ pour les états de contraintes planes.

2.3 Modèle de Mohr-Coulomb modifié

Le modèle de Mohr-Coulomb modifié (MMC), proposé par Bai and Wierzbicki [6], est une transposition du modèle de Mohr-Coulomb dans l'espace $(\bar{\varepsilon}_f, \eta, \bar{\theta})$. Il permet d'exprimer la déformation plastique équivalente à rupture par la relation :

$$\bar{\varepsilon}_f = \left\{ \frac{A}{c_2} [1 - c_\eta(\eta - \eta_0)] \times \left[c_\theta^s + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (c_\theta^{ax} - c_\theta^s) \left(\sec\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) - 1 \right) \right] \times \left[\sqrt{\frac{1 + c_1^2}{3}} \cos\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad (4)$$

avec A le module de plasticité et n le coefficient d'érouissage du matériau ($\bar{\sigma} = A\bar{\varepsilon}^n$), $c_\theta^{ax} = 1$ si $\bar{\theta} \geq 0$ et c_θ^c si $\bar{\theta} < 0$. Il y a au total huit paramètres mais qui peuvent être réduits à deux dans le cas d'une loi d'écoulement de von Mises ($c_\eta = 0$ et $c_\theta^s = c_\theta^c = 1$).

Ce modèle est identifié pour des cas de chargements quasi-monotones. Il est donc nécessaire de le compléter pour les cas de chargements non-proportionnels par un indicateur d'endommagement non-linéaire, D , défini pour une déformation plastique équivalente $\bar{\varepsilon}_p$ par :

$$dD = m \left(\frac{\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f(\eta, \bar{\theta})} \right)^{m-1} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f(\eta, \bar{\theta})} \quad (5)$$

la rupture apparaît lorsque $D = 1$.

3 Essais de chargement non-proportionnels

3.1 Matériaux

Les matériaux testés sont un aluminium AA-2024-T3 d'épaisseur 1.2mm, issu de l'industrie aéronautique et un acier dual phase DP450 d'épaisseur 0.8mm couramment utilisé dans l'automobile.

3.2 Méthodologie d'application des chargements

Le chargement appliqué est un chargement non-proportionnel qui est la succession de deux chargements proportionnels simples. Le premier chargement imposé est la traction uniaxiale permettant d'appliquer une pré-déformation, il est suivi de la traction équibiaxiale. Différentes pré-déformations axiales ont été testées. Pour l'aluminium nous avons des déformations plastiques axiales après le premier chargement de $\bar{\varepsilon}_p = 0.05$ et 0.095 . L'acier est pré-déformé à des valeurs de $\bar{\varepsilon}_p = 0.067$ et 0.17 .

3.3 Description des essais

Les essais de traction uni-axiale permettant d'appliquer la pré-déformation aux matériaux sont effectués par un essai de traction simple sur une éprouvette de grande taille. La zone utile de l'éprouvette a une longueur de 440mm et une largeur de 200mm (voir fig. 2a). Chaque essai de pré-déformation par traction simple est suivi par inter-corrélation d'images 2D afin de vérifier que le champ de déformation reste homogène dans la zone utile de l'éprouvette. À la fin du chargement, l'éprouvette de traction simple est déchargée, la zone utile de la tôle est alors prélevée pour y découper les éprouvettes nécessaires pour appliquer le second chargement.

L'état de tension équi-biaxiale est obtenu sur les deux matériaux par poinçonnement hémisphérique. L'éprouvette (voir fig. 2b) est encastrée sur son contour, la surface libre est de diamètre 30mm et un poinçon hémisphérique de rayon 6.35mm permet d'emboutir la tôle. Au sommet du dôme qui est créé, le matériau se déforme localement sous un état de déformation équi-biaxiale. Le champ de déformation est suivi par inter-corrélation d'images 3D.

Les premiers essais permettant un état de traction à déformation plane ont été effectués sur l'aluminium AA-2024-T3. Cet état de contrainte est appliqué par pliage à l'aide d'une lame sur une éprouvette rectangulaire (voir fig. 2b et fig. 2c). Au sommet de la zone de pliage, on retrouve un état de traction plane vers le centre de l'éprouvette. Cet essai ne permet pas d'atteindre la rupture sur l'acier DP450. Les résultats sont en cours d'étude et ne sont donc pas présentés ici.

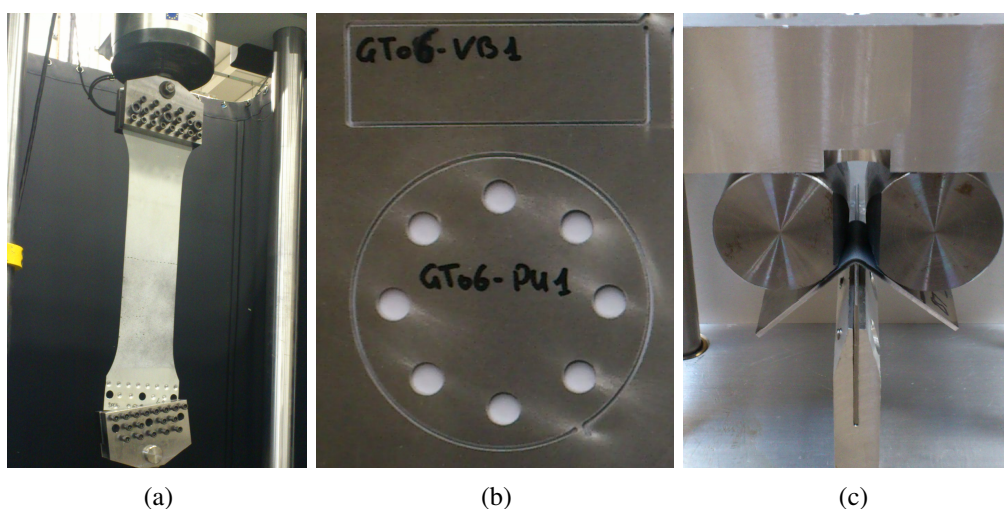


FIGURE 2 – Epreuve de grande traction de DP450 (2a) - Découpe des éprouvettes de pliage (en haut sur 2b) et de poinçonnement hémisphérique de AA-2024-T3 (en bas sur 2b) - Essai de pliage par lame (2c).

3.4 Résultats

Nous allons maintenant comparer les résultats d'essais à trajet de chargement proportionnel et non-proportionnel. Nous nous focaliserons sur une des hypothèses du modèle MMC qui est que la déformation à rupture en traction uniaxiale est la même qu'en traction équi-biaxiale.

Les résultats sur le DP450 (tab. 1) et le AA-2024-T3 (tab. 2) des chargements non-proportionnels montrent une déformation équivalente à rupture quasi-identique pour les deux valeurs de pré-déformation. Ce résultat valide l'hypothèse que ces deux chargements imposent un même endommagement au matériau et donnent la même déformation à rupture pour chaque matériaux.

TABLE 1 – Résultats des différents trajets de chargement sur l'acier DP450

	$\bar{\epsilon}_{Load1}$	$\bar{\epsilon}_{Load2}$	η_{av}	$\bar{\theta}_{av}$	$\bar{\epsilon}_{total}$	$\begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix}$
Traction équi-biaxiale	1.34	/	0.667	-1	1.4	$\begin{matrix} 1.320 \\ 1.484 \end{matrix}$
Tr. Uni. + Tr. Equi.	0.067	1.351	0.651	-0.906	1.418	$\begin{matrix} 1.409 \\ 1.427 \end{matrix}$
Tr. Uni. + Tr. Equi.	0.17	1.258	0.627	-0.762	1.428	$\begin{matrix} 1.425 \\ 1.430 \end{matrix}$

TABLE 2 – Résultats des différents trajets de chargement sur l'aluminium AA-2024-T3

	$\bar{\epsilon}_{Load1}$	$\bar{\epsilon}_{Load2}$	η_{av}	$\bar{\theta}_{av}$	$\bar{\epsilon}_{total}$	$\begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix}$
Traction équi-biaxiale	0.57	/	0.667	-1	0.57	$\begin{matrix} 0.570 \\ 0.590 \end{matrix}$
Tr. Uni. + Tr. Equi.	0.05	0.526	0.638	-0.826	0.576	$\begin{matrix} 0.568 \\ 0.583 \end{matrix}$
Tr. Uni. + Tr. Equi.	0.095	0.491	0.613	-0.676	0.586	$\begin{matrix} 0.582 \\ 0.589 \end{matrix}$

4 Conclusion

L'ensemble des essais effectués permet de faire quelques conclusions quant au choix du modèle de rupture. Les observations faites sont en accord avec les hypothèses du modèle de Mohr-Coulomb modifié. La déformation à rupture semble être la même sous un état de contrainte de tension uniaxiale et équi-biaxiale.

Afin de compléter ce travail, il est nécessaire d'obtenir les valeurs de déformation à rupture du DP450 et de l'aluminium AA-2024-T3 en traction plane. Une autre valeur importante du modèle est la déformation à rupture en cisaillement, dont les essais sont difficiles à mettre en place pour des matériaux à forte ductilité et faible épaisseur.

Remerciements

Recherches soutenues financièrement par le Ministère de la Défense - Direction Générale de l'Armement; et par une allocation régionale de recherche de la Région Bretagne.

Références

- [1] V. Grolleau, B. Galpin, A. Penin, and G. Rio, "Modelling the effect of forming history in impact simulations : evaluation of the effect of thickness change and strain hardening based on experiments," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 13, no. 4, pp. 363–373, 2008.

-
- [2] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, and Y. Bai, “Calibration and evaluation of seven fracture models,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 47, no. 4–5, pp. 719–743, 2005. A Special Issue in Honour of Professor Stephen R. Reid’s 60th Birthday.
- [3] J. Dournaux, S. Bouvier, and P. Vacher, “Full-field measurement technique and its application to the analysis of materials behaviour under plane strain mode,” *Material Science and Engineering A*, vol. 500, pp. 47–62, September 2008.
- [4] J. Papasidero, *Experimental and numerical analysis of ductile fracture under multiaxial loading*. PhD thesis, Polytechnique, 2014.
- [5] C. C. Roth and D. Mohr, “Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories,” *International Journal of Plasticity*, vol. 79, pp. 328–354, 2016.
- [6] Y. Bai and T. Wierzbicki, “Application of extended mohr–coulomb criterion to ductile fracture,” *Int J Fract*, vol. 161, pp. 1–20, Jan. 2010.