

# Caractérisation et modélisation du comportement mécanique d'une mousse fragile

O. Kraiem<sup>a</sup>, M. Houillon<sup>b</sup>, N. Schmitt<sup>a</sup>, H. Zhao<sup>a</sup>

a. LMT-Cachan/ENS Cachan/CNRS/Université Paris Saclay,  
{kraiem,schmitt,zhao}@lmt.ens-cachan.fr

b. TN International/ Montigny-le-Bretonneux,  
marie.houillon@areva.com

## Résumé :

*Les matériaux cellulaires fragiles suscitent aujourd'hui un intérêt croissant dans différents domaines d'applications. Ces mousses allient faible densité et bonnes performances mécaniques ce qui les rend compatibles avec une utilisation comme matériaux d'allègement des structures ou d'absorption d'énergie. L'objectif de la présente étude est double. Il consiste à caractériser le comportement mécanique d'une mousse à matrice vitreuse utilisée comme absorbeur de choc et sous des sollicitations complexes. Dans ce but, des essais de compression libre et confiné à différentes vitesses de déformations ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques. La réponse multiaxiale a été caractérisée à travers des essais triaxiaux sur la machine Astrée du LMT-Cachan. Les mécanismes d'endommagement mis en jeu lors des essais de compression quasi-statique ont été observés et analysés via la micro-tomographie RX. A partir des résultats expérimentaux, le modèle de Deshpande Fleck légèrement modifié a été identifié. La capacité du modèle à décrire des modes de sollicitation complexes a été validée à partir d'essais d'écrasement de minicapots métalliques remplis de mousse.*

## Abstract :

*Brittle foams arouse high interest in various fields of applications. These foams have a good compromise between low density and good mechanical performances compatible with absorbing energy applications. The aim of the study is twofold: it consists to characterize the mechanical behaviour of brittle ceramic foam and to identify a constitutive model for predicting the mechanical behaviour under multiaxial loadings. For this purpose, different compression tests at various strain rates were performed on cylindrical samples to study the sensitivity to the applied strain rate. The damage mechanisms involved during confined quasi-static compression tests were observed and analysed by RX-tomography. The multiaxial response was characterized thanks to triaxial tests on the Astree machine at LMT-Cachan. From the experimental data, the slightly modified Deshpande-Fleck model has been identified. The capability of this model to describe the brittle foam response under multiaxial loadings has been validated on crashing tests.*

**Mots clés : Mousse fragile, comportement mécanique, mécanismes d'endommagement, essais triaxiaux, modélisation**

## 1 Introduction

L'utilisation des matériaux cellulaires se répand de plus en plus dans l'industrie de l'emballage. En raison de leurs bonnes performances mécaniques à faible densité ils sont notamment utilisés comme absorbeurs d'énergie en cas de choc ou d'un impact. Les mousses métalliques, les matériaux à structure nid d'abeilles et le bois avec ses différentes essences sont les plus utilisés pour ce type d'application. Cependant, le défaut de ces matériaux est leur grande sensibilité du comportement mécanique à l'humidité, la température et la vitesse de sollicitation et pour certains la grande variabilité des propriétés mécaniques.

Les mousses fragiles à base céramique ou carbone sont généralement utilisées comme isolants thermiques ou filtres. Ils possèdent également une bonne capacité à absorber des chocs à condition qu'elles soient confinées latéralement [10, 13, 11, 3]. Le comportement mécanique de ces mousses fragiles a été peu étudié. Les rares études menées se sont principalement focalisées sur la caractérisation des propriétés mécaniques intrinsèques sous sollicitations uniaxiales (traction/compression) [10, 13, 12]. L'endommagement et la rupture de ces mousses ont été étudiés récemment à partir d'observations post-mortem sous Microscopie Electronique à Balayage (MEB) ou micro-Tomographie RX [14, 2]. Le comportement multiaxial de mousses carbone

réticulé sous des sollicitations de compression axisymétriques et biaxiales a été étudié par Triantafillou et Gibson [15]. Du point de vue de la modélisation, le comportement mécanique est décrit de manière phénoménologique à partir de relations empiriques basées sur une idéalisation de la structure simplifiée de mousse [9]. Ces relations relient les propriétés élastiques et de résistance de la mousse à la densité relative et des paramètres géométriques de la microstructure faibles déformations. L'objectif visé dans cette étude est de caractériser et modéliser le comportement mécanique d'une mousse fragile en vue de son utilisation comme moyen d'absorption d'énergie. La première partie de ce document présente quelques résultats expérimentaux sur du comportement mécanique sous sollicitations uniaxiales et multiaxiales et détaille les mécanismes de déformation observés au cours de l'écrasement de la mousse par des essais uniaxiaux ex-situ sous tomographie RX. La seconde partie est consacrée à l'identification du modèle de comportement de Deshpande Fleck légèrement adapté pour cette famille de matériaux et la validation au travers de la comparaison des résultats d'une simulation numérique de l'écrasement d'un mini-capot et d'une expérience.

## 2 Caractérisation expérimentale

### 2.1 Matériau et microstructure

La mousse étudiée, de faible densité ( $0.32 \text{ g/cm}^3$ ), est obtenue par carbonisation de mousses polymères à des températures comprises entre 2500 à 3000 °C. Elle est caractérisée par une microstructure à cellules ouvertes et une porosité de l'ordre de 82 %. La micrographie de la figure 1 prise à l'aide d'un microscope électronique à balayage fait apparaître la distribution et la taille des motifs. On distingue : les macrocellules (100 à 200  $\mu\text{m}$ ) et les microcellules de faible dimension de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . On note également que la géométrie des macrocellules est légèrement allongée dans la direction de moussage (Fig. 1.b). Cette anisotropie structurale peut affecter la réponse mécanique du matériau.

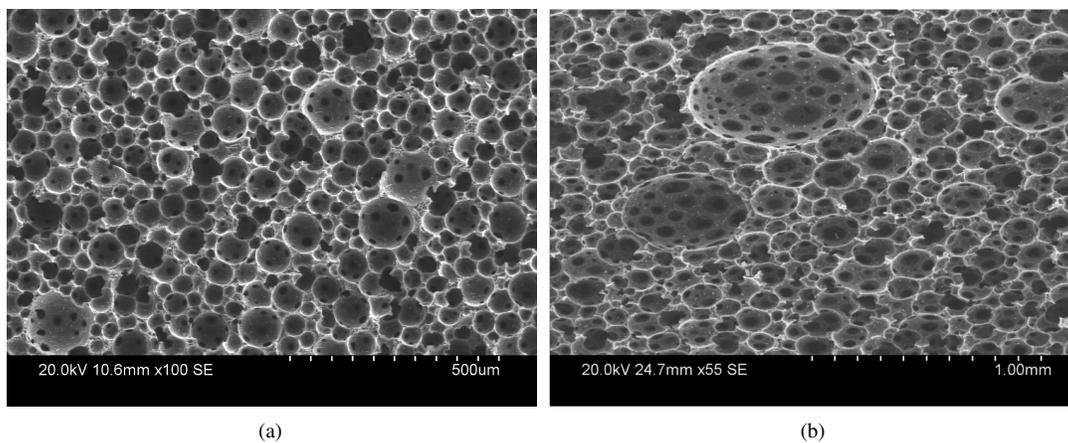


Figure 1: Microstructure de la mousse céramique observée au MEB

### 2.2 Comportement uniaxial

Le comportement mécanique uniaxial de la mousse céramique a été caractérisé dans cette étude sous un chargement en compression à différentes vitesses de sollicitations. En quasi-statique, les essais ont été réalisés sur une presse MTS équipée d'une cellule d'effort de 10 KN. Le déplacement relatif entre les deux plateaux de compression a été mesuré l'aide d'un capteur LVDT. Les essais libres ont été effectués sur des éprouvettes cubiques de taille 45 mm tandis que les essais confinés sur des éprouvettes cylindriques (diamètre  $D = 29 \text{ mm}$ , hauteur  $H = 30 \text{ mm}$ ). En compression confinée, la pression latérale a été induite par la présence d'un conformateur métallique (XC35) d'épaisseur 40 mm. La sensibilité à la vitesse de sollicitation a été étudiée à travers des essais de compression dynamique confinée en utilisant un système de barres d'Hopkinson en acier de 22 mm de diamètre.

En compression libre, les courbes contrainte – déformation confirment la réponse élastique fragile de la mousse. En présence de confinement latéral, le matériau présente un comportement similaire à celui observé sur les mousses ductiles avec trois zones bien délimitées (élasticité - plateau - densification) (fig.1.b). Cependant la transition élasticité - plateau pour ce type des mousses est marquée par une première rupture fragile. La figure 1.c montre également que le comportement en compression est légèrement influencé par l'anisotropie structurale induite par l'orientation des cellules (fig.1.c). Les essais de compression dynamique montrent qu'il n'y a pas de dépendance à la vitesse de déformation entre 10 et 20  $\text{m.s}^{-1}$  (fig.1.d).

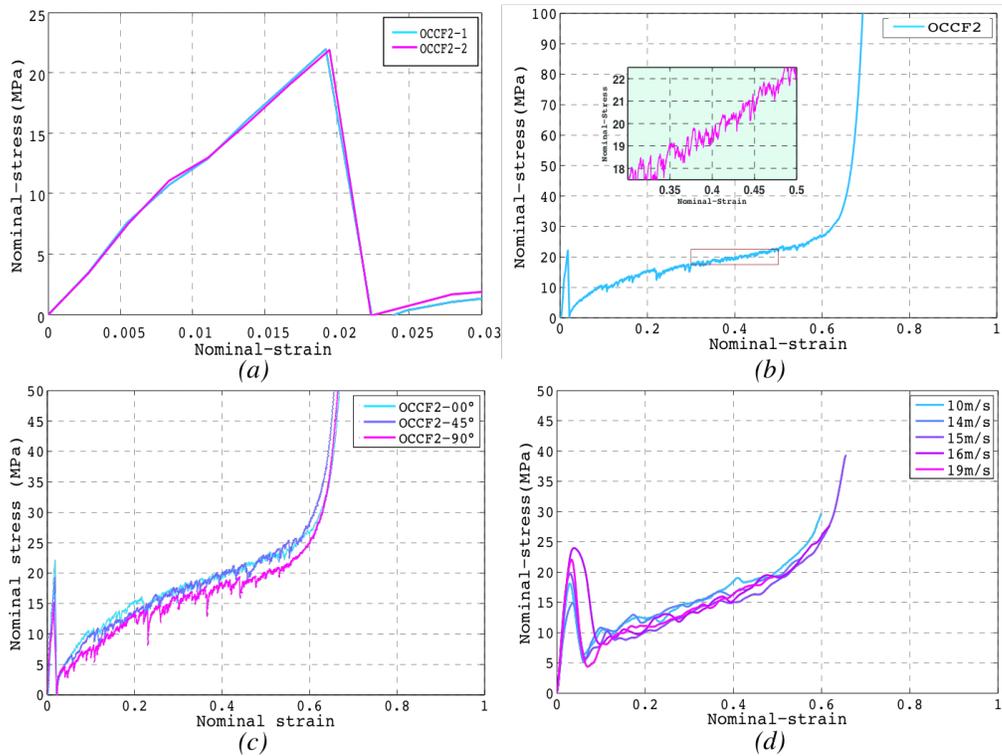


Figure 2: Comportement mécanique de la mousse céramique sous chargement uniaxial : a) réponse mécanique en compression libre, b) réponse mécanique en compression confinée, c) effet de l'anisotropie, d) effet de la vitesse de sollicitation

### 2.3 Mécanismes de déformation

Des essais de compression uniaxiale confinée ex-situ en micro-tomographie aux rayons X ont été effectués afin d'étudier les mécanismes qui gouvernent la déformation et la rupture au cœur de l'échantillon de la mousse. Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques placées dans un conformateur rigide en polycarbonate. Des coupes tomographiques transversales des images 3D prises après chaque déchargement et à différents niveaux de déformation résiduelle sont présentées sur la figure 3. Elles montrent qu'au moment de la rupture fragile, l'éprouvette a été brutalement rompue en deux parties séparées par une petite bande de cisaillement de plus forte densité (zone plus blanche). Ensuite, au fur et à mesure que la déformation résiduelle croît, l'éprouvette a été fragmentée en morceaux de plus en plus petits. Ces morceaux frottant entre-eux ont formés des couches de poudre de plus en plus nombreuses jusqu'à la densification complète de l'éprouvette. Les coupes (b) à (f) illustrent la formation des morceaux de la mousse, la présence de fissures perpendiculaires aux bandes de cisaillement ainsi que les couches de poudre générées par frottement.

### 2.4 Comportement multiaxial

Le comportement multiaxial de la mousse a été identifié à partir d'essais de compression triaxiaux sur la machine d'essais Astrée disposant de six vérins sur trois axes perpendiculaires. Des éprouvettes cubiques ( $40 \times 40 \times 40$  mm) ont été insérées dans la cavité cubique de taille variable d'un montage de compression constitué de six éléments métalliques mobiles (fig.4.a) se déplaçant sous l'application de la force ou du déplacement exercé par le vérin [1, 6]. Le déplacement relatif de chaque vérin avec son opposé a été mesuré par un capteur laser. La force appliquée sur chaque facette de l'éprouvette a été déterminée à partir de la mesure de l'effort appliqué par chaque vérin. En raison du caractère fragile de la mousse, les essais effectués ont été pilotés en déplacement imposé.

Trois types d'essais sont réalisés :

- des essais de compression iso-déplacement où l'éprouvette est soumise à une vitesse de déplacement identique dans les directions 1-3,
- des essais oedométriques où les déplacements radiaux sont bloqués dans les directions 1-2 et l'éprouvette uniquement

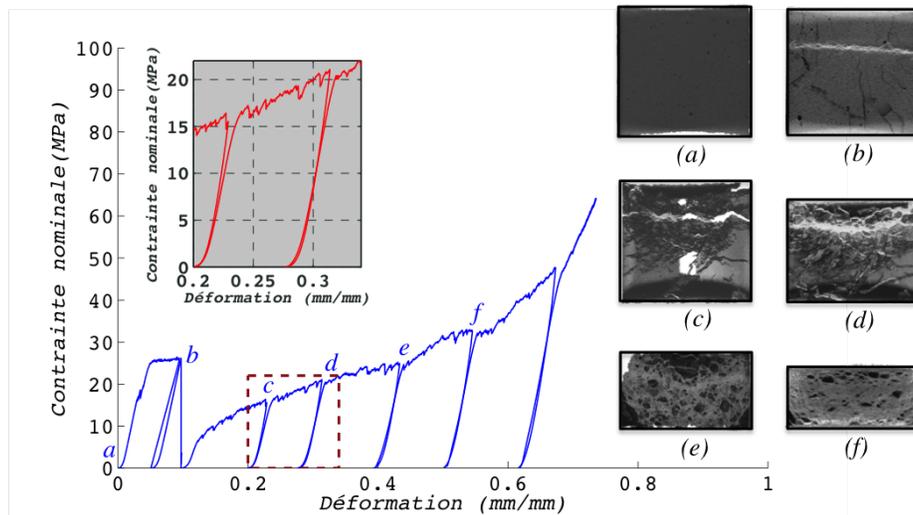


Figure 3: Réponse mécanique en compression confinée et coupes tomographiques associées

sollicitée dans la direction 3

- des essais triaxiaux où l'éprouvette est sollicitée en compression iso-déplacement ou oedométrique jusqu'à un effort donné, puis le chargement se poursuit axialement dans la direction 3 en maintenant un chargement de confinement constant en effort dans les directions 1-2.

Sur les figures 4b-4d, les contraintes principales sont reportées en fonction de la déformation volumique pour ces différents essais. Dans l'essai iso-déplacement (fig.4.b), on constate que la résistance dans la direction de moussage est légèrement supérieure à celle des deux autres directions, révélant le caractère légèrement isotrope transverse du matériau. En compression oedométrique (fig.4.b), un effet du confinement est observé. La figure 4.c montre que la pression appliquée latéralement par les vérins augmente continuellement avec la déformation volumique. L'effet du confinement est également confirmé aussi par les essais triaxiaux (fig.4.d) qui ont mis clairement en évidence la dépendance de la capacité de chargement de la mousse vis-à-vis la pression de confinement appliquée .

### 3 Identification d'un modèle de comportement mécanique

En raison de la faible anisotropie observée, la mousse traitée dans cette étude a été considérée homogène et isotrope. Le modèle de comportement mécanique retenu est la loi élastique isotrope associée à une loi de plasticité compressible développée dans les travaux de Deshpande-Fleck [4, 5]. Cette loi possède un écoulement plastique associé et est caractérisée par la surface de charge elliptique définie par :

$$\Phi = \hat{\sigma}^2 - Y^2 = \frac{1}{[1 + (\frac{\alpha}{3})^2]} [\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] - Y^2 = 0 \quad (1)$$

où  $\sigma_m = -\frac{1}{3}(\text{tr}\sigma)$  est la contrainte hydrostatique et  $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}s : s}$  est la contrainte équivalente de Von Mises définie à partir du tenseur des contraintes déviatoriques  $s = \sigma + \sigma_m \mathbf{I}$ .

La fonction d'écrouissage  $Y$  est définie par :

$$Y = \sigma_{pl} + \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_d} + \alpha_2 \ln\left(\frac{1}{1 - (\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_d})^\beta}\right) \quad (2)$$

où  $\sigma_{pl}$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon_d$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ , sont des paramètres matériau qui peuvent être identifiés se déterminent à partir de l'essai de compression triaxiaux . Le paramètre  $\alpha$  caractérise la forme de l'ellipse. Il dépend du coefficient de poisson plastique de la manière suivante:

$$\alpha = 4.5 \frac{1 - 2\nu^p}{1 + \nu^p} \quad (3)$$

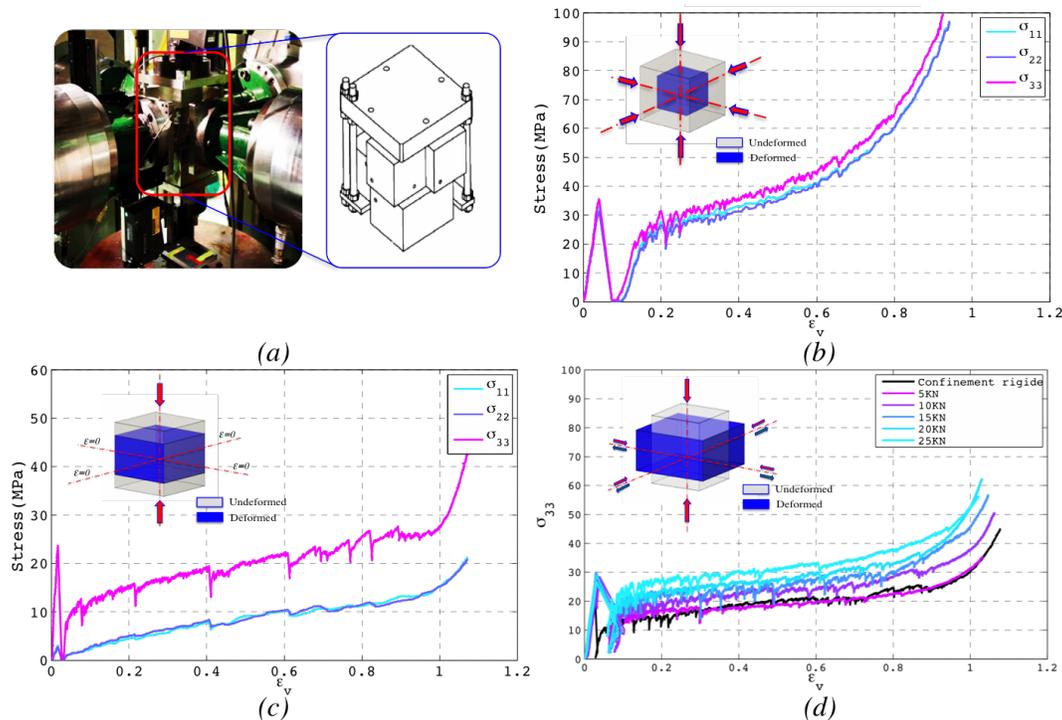


Figure 4: Essais de compression triaxiaux des mousses : a) montage des blocs installé sur la machine Astrée [1], Réponses de la mousse sous des chargements multiaxiaux : b) réponses sous un chargement de compression iso-déplacement, c) réponses sous un chargement de compression oedométrique d) réponses sous un chargement de compression triaxiale

Afin de prendre en compte les déformations radiales plastiques au cours de l'écrasement de la mousse, nous avons modifié l'expression pilotant la forme de la surface de charge en introduisant un coefficient de Poisson plastique variable en fonction de la déformation volumique (Eq. 4)

$$\nu^p = \nu_0 + \eta \varepsilon_{vol}^\xi \quad (4)$$

où  $\nu_0$ ,  $\eta$ ,  $\xi$ , sont des paramètres matériau se déterminent à partir de l'évolution du coefficient de poisson en fonction de la déformation plastique volumique. Lorsque  $\nu^p = 0.5$  le matériau est complètement densifié et le critère de Deshpande-Fleck (Eq. 1) se réduit à celui de Von Mises.

L'identification du modèle de comportement a été faite sur la base de l'ensemble des essais de compression triaxiale par minimisation entre les réponses du modèle et l'ensemble des courbes expérimentales. La figure 5.a montre l'évolution du coefficient de Poisson plastique en fonction de la déformation volumique ainsi que le calage de la surface de charge (iso-volume) dans le plan ( $\sigma_m - \sigma_e$ ) du modèle de Deshpande-Fleck modifié.

## 4 Validation expérimentale du modèle

Les modifications de la loi Deshpande Fleck ont été introduites dans le code éléments finis LS-Dyna [7] via une routine utilisateur. L'objectif de cette validation était de vérifier l'aptitude du modèle à prédire le comportement mécanique de la mousse sous des états de chargements complexes. Pour valider le modèle identifié, des essais d'écrasement d'un mini-capot amortisseur constitué d'une enveloppe métallique en acier 314L contenant de la mousse présente sous la forme d'une éprouvette cylindrique ( $L = 19 \text{ mm} \times D = 68 \text{ mm}$ ) ont été réalisés. L'acier 314L a été modélisé par une loi de comportement de type "Piecewise Linear Plasticity : MAT024 " dans LS-DYNA avec un jeu de paramètres matériaux extrait de la littérature[8].

Dans les essais de validation présentés, les mini-capots sont fixés sur un plan incliné de  $15^\circ$  par rapport à l'horizontale (Fig 6a. Le vérin qui applique la charge se déplace verticalement à une vitesse  $0.05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Les résultats obtenus sur la figure 6b montrent une bonne concordance entre la courbe expérimentale et les prédictions du modèle jusqu'à 11 mm d'écrasement. Au-delà, lorsque le matériau devient plus dense, on constate un écart significatif entre les

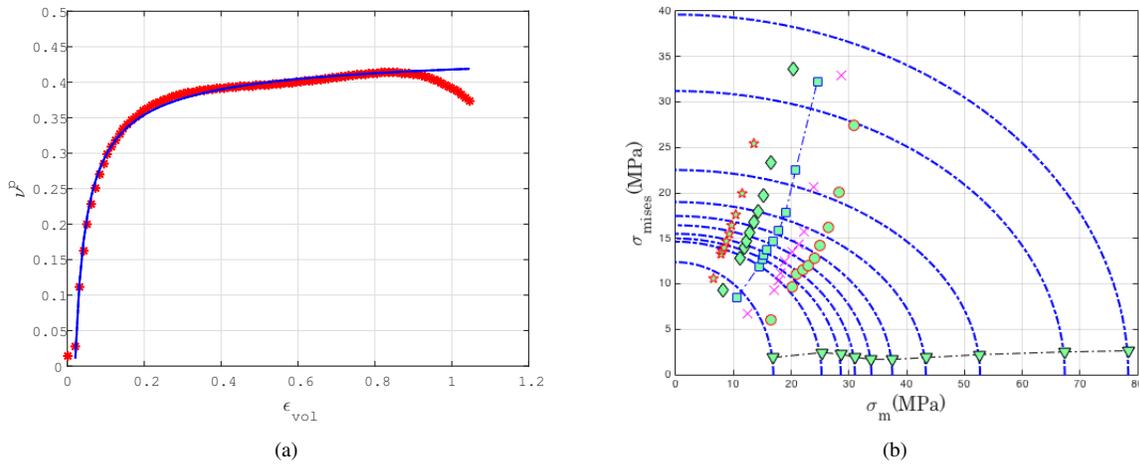


Figure 5: Identification du modèle : a) variation de coefficient de Poisson plastique de la mousse avec la déformation volumique, b) identification des surfaces de charge iso-densité

deux courbes expérimentale et la courbe numérique. Cet écart s'explique sans doute par la nécessité d'une bonne identification du coefficient de Poisson plastique pendant la densification du matériau.

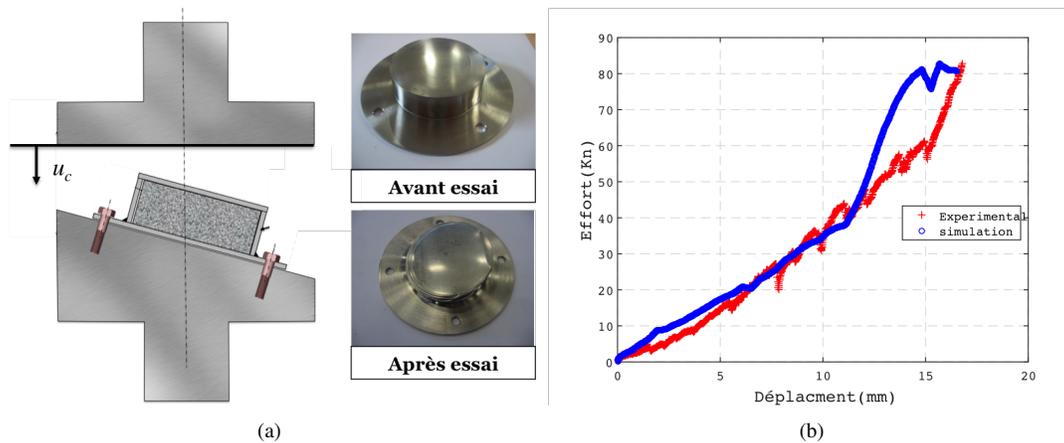


Figure 6: Essai de validation de la loi de Deshpande Fleck modifié : a) schématisation de l'essai d'écrasement du mini-capot incliné, b) comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique

## 5 Conclusions

Les travaux menés dans cette étude ont permis de caractériser le comportement mécanique d'une mousse fragile sous différents trajets de chargement. En l'absence de confinement, le comportement est du type élastique fragile avec une faible sensibilité à la vitesse de déformation. En présence d'un confinement, on observe l'existence d'un long plateau où une grande quantité d'énergie peut être absorbée. Des observations post-mortem ont permis d'identifier les principaux mécanismes de ruine qui gouvernent la déformation de ce matériau en compression confinée. Les essais triaxiaux sur Astrée ont permis d'identifier le caractère légèrement isotrope transverse de la mousse céramique et mis en évidence l'influence de confinement. Le modèle de Deshpande Fleck a été identifié à condition de prendre en compte un coefficient de poisson plastique variable en fonction de la déformation volumique. En terme de perspectives, il est envisagé d'optimiser la procédure d'identification des paramètres du modèle afin d'améliorer ses capacités prédictives.

## References

- [1] R. BRESCIANI CANTO, *Theoretical and experimental study of the compaction and sintering processes of polytetrafluoroethylene (PTFE)*, theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, Aug. 2007.
- [2] O. CATY, F. GAUBERT, G. HAUSS, AND G. CHOLLON, *Characterisation of mechanical properties of cellular ceramic materials using x-ray computed tomography*, in *Optical Measurements, Modeling, and Metrology*, Volume 5, T. Proulx, ed., Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Springer New York, 2011, pp. 39–46.
- [3] J. G. DE SALAZAR, M. BARRENA, G. MORALES, L. MATE SANZ, AND N. MERINO, *Compression strength and wear resistance of ceramic foams-polymer composites*, *Materials Letters*, 60 (2006), pp. 1687 – 1692.
- [4] V. DESHPANDE AND N. FLECK, *Isotropic constitutive models for metallic foams*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (2000), pp. 1253 – 1283.
- [5] V. DESHPANDE AND N. FLECK, *Multi-axial yield behaviour of polymer foams*, *Acta Materialia*, 49 (2001), pp. 1859 – 1866.
- [6] C. FRÉDY, R. B. CANTO, N. SCHMITT, S. ROUX, AND R. BILLARDON, *Modelling of the mechanical behaviour of two pure ptfе powders during their compaction at room temperature*, *AIP Conference Proceedings*, 1542 (2013).
- [7] J.O.HALLQUIST, *Ls-dyna theoretical manual*, May 1998.
- [8] KRAIEM OMAR, *Modélisation du comportement mécanique des mousses fragiles à matrice vitreuse*, Master's thesis, UPMC - Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2010.
- [9] M. F. A. LORNA J. GIBSON, *Cellular Solids Structure and Properties*, Cambridge Solid State Science Series, August 1999.
- [10] H. LUO, A. BHAT, M. D. DEMETRIOU, H. LU, AND J. C. HANAN, *Dynamic compressive behavior of bulk metallic glass foam*, 2019.
- [11] M.HOUILLO, *Shock-absorbing protection element for packaging for the transport and/or temporary storage of radioactive materials*, 2015.
- [12] P. C. MICHAEL SCHEFFLER, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties & Applications*, Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [13] R. J. PANDURANGA R, SHIVAKUMAR KN, *Energy absorption performance of an eco-core – a syntactic foam*, 2007, p. 2336–2346.
- [14] H.-W. SONG, Q.-J. HE, J.-J. XIE, AND A. TOBOTA, *Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: In situ compression tests inside {SEM}*, *Composites Science and Technology*, 68 (2008), pp. 2441 – 2450. *Deformation and Fracture of Composites: Analytical, Numerical and Experimental Techniques*, with regular papers.
- [15] T. TRIANTAFILLOU AND L. GIBSON, *Multiaxial failure criteria for brittle foams*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 32 (1990), pp. 479 – 496.