

# MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DE MOUSSES MÉTALLIQUES SOUS SOLLICITATIONS HAUTEMENT DYNAMIQUES

**R. Barthélémy**, F. Vermeersch *MBDA France 1 avenue Réaumur, 92358 Le Plessis-Robinson cedex, France. Téléphone : 01 71 54 47 99 Adresse(s) électronique(s) : romain.barthelemy@mbda-systems.com, francois.vermeersch@mbda-systems.com*

N. Jacques, S. Kerampran *ENSTA Bretagne, LBMS 2 rue François Verny, 29806 Brest cedex 9, France. Téléphone : 02 98 34 89 36, Télécopie : 02 98 34 87 30 Adresse(s) électronique(s) : nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr, steven.kerampran@ensta-bretagne.fr*

**Mots clés : Mousses métalliques, Atténuation de choc, Modélisation de matériaux, Micro-inertie, Méthode des éléments finis**

## 1 INTRODUCTION

Une mousse est une forme particulière de matériau poreux constituée d'un ensemble de cellules délimitées par un squelette solide ou liquide. Les travaux présentés se concentrent sur les mousses dont le squelette est métallique. Durant les dernières décennies, de nombreux domaines d'applications pour les matériaux cellulaires ont émergé. Citons par exemple l'isolation phonique ou thermique, la conception de structures légères, l'absorption d'énergie et l'atténuation d'ondes de choc (Gibson et Ashby, 1997). La structure particulière des matériaux cellulaires leur permet de subir des déformations d'amplitude importante à des niveaux de contrainte relativement faibles. Cette capacité les rend particulièrement attractifs pour dissiper de grandes quantités d'énergie et "amortir" des impacts.

On distingue généralement deux types de matériaux cellulaires, ceux à porosités ouvertes et ceux à porosités fermées (Fig. 1). Dans le premier cas, le squelette est constitué de ligaments reliés les uns aux autres et laissant possible la circulation de fluide à l'intérieur de l'échantillon. Le second type de squelette est constitué de parois fermant les pores. Si un fluide interne est présent, il est donc nécessairement piégé à l'intérieur des cellules. Les mousses à porosités fermées dont le squelette est constitué d'un alliage d'aluminium sont l'objet de la présente étude.

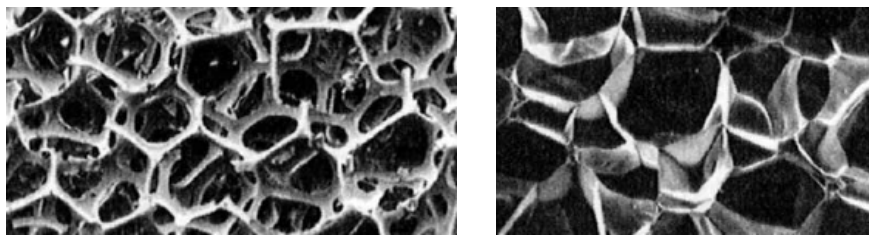


FIG. 1 – Deux types de microstructures de mousses métalliques : à porosités ouvertes à gauche et à porosités fermées à droite (Gibson et Ashby, 1997)

Il a été montré (Dannemann et Lankford, 2000) que les mousses métalliques présentent une sensibilité importante à la vitesse de déformation. Plusieurs raisons pouvant expliquer ce phénomène sont discutées par Zhao et al. (2005). Parmi les mécanismes envisagés, les effets de micro-inertie (effets d'inertie locaux induits par l'écrasement des cellules de la mousse) sont sans doute prépondérants pour des mousses d'aluminium. Les efforts de modélisation de ce phénomène sont très rares et, à notre connaissance, limités au cas de mousses à porosités ouvertes (Romero et al., 2010). Dans le travail présenté ici, nous nous proposons de modéliser la réponse dynamique d'une mousse métallique à porosités fermées en intégrant les effets de micro-inertie.

## 2 MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES MOUSSES MÉTALLIQUES SOUS COMPRESSION UNIAXIALE

### 2.1 Réponse Quasi-Statique

Une mousse soumise à une sollicitation de compression passe généralement par trois phases : une première de compaction élastique linéaire suivie d'une phase "plateau" pour laquelle la contrainte transmise est quasi-constante. Enfin, la dernière phase de densification (ou écrouissage) voit une augmentation importante de la contrainte. Pour nos besoins, un modèle élasto-plastique avec écrouissage non linéaire a été utilisé pour représenter ces phases. Cette modélisation repose sur plusieurs éléments :

- l'utilisation de la déformation logarithmique :

$$\epsilon = \ln(F); \quad (1)$$

- la décomposition additive de la déformation en une partie élastique et plastique :

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p; \quad (2)$$

- une relation décrivant la réponse élastique linéaire :

$$\epsilon_e = \Sigma / E^*; \quad (3)$$

- une loi d'écoulement, décrivant l'évolution de la déformation plastique :

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{p} \cdot \text{sgn}(\Sigma); \quad (4)$$

- les conditions de complémentarités, portant notamment sur la vitesse de déformation plastique équivalente  $\dot{p}$  :

$$\dot{p} \geq 0, \quad |\Sigma| - \Sigma_y \leq 0, \quad (|\Sigma| - \Sigma_y) \cdot \dot{p} = 0; \quad (5)$$

- la définition de la limite élastique sous deux formes permettant de décrire la phase plateau et la phase d'écrouissage :

$$\begin{aligned} \Sigma_y &= \Sigma_{pl} \quad \text{si } p \leq \epsilon_d \\ \Sigma_y &= \Sigma_{pl} + K_p \cdot (p - \epsilon_d)^n \cdot \frac{\epsilon_l - \epsilon_d}{\epsilon_l - p} \quad \text{si } p \geq \epsilon_d \end{aligned} \quad (6)$$

Les différentes équations régissant ce modèle font intervenir 6 paramètres : le module élastique  $E^*$ , la limite élastique initiale  $\Sigma_{pl}$ , la déformation de densification  $\epsilon_d$ , le module d'écrouissage  $K_p$ , l'exposant d'écrouissage  $n$  et la déformation de locking  $\epsilon_l$ . Les valeurs de ces paramètres correspondant à une mousse d'aluminium de type Alporas<sup>®</sup> (densité relative de 0,11) ont été déterminées à partir de données expérimentales de Radford et al. (2005) en utilisant une méthode d'identification par moindres carrés.

### 2.2 Effets de Micro-Inertie

Le modèle précédent étant conçu pour décrire le comportement d'une mousse sous sollicitation quasi-statique, il ne peut rendre compte de la sensibilité de ce type de matériau à la vitesse de déformation. Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous nous proposons de décrire les effets de micro-inertie sur le comportement dynamique des mousses d'aluminium à porosités fermées. Pour ce faire, un nouveau modèle a été développé. Celui-ci repose sur une analyse micromécanique et une procédure d'homogénéisation dynamique (Molinari et Mercier, 2001).

Le volume élémentaire représentatif (VER) qui a été considéré est une coque initialement sphérique. Sur cette base, la contrainte macroscopique dans un échantillon de mousse peut être écrite comme la somme de deux termes :

$$\Sigma = \Sigma^{sta}(F) + \Sigma^{dyn}(\ddot{F}) \quad (7)$$

$$\Sigma^{dyn}(\ddot{F}) = \frac{\rho_0}{3} \cdot R_c^2 \cdot \ddot{F} \quad (8)$$

$\Sigma^{sta}$  est appelée contrainte statique et représente la réponse du matériau sans micro-inertie.  $\Sigma^{sta}$  est décrit par le modèle élasto-plastique à écrouissage non linéaire introduit précédemment.  $\Sigma^{dyn}$  est appelée contrainte dynamique (ou inertielle), induite par les effets de micro-inertie. Cette composante dépend essentiellement de deux paramètres physiques : la masse volumique initiale de la mousse et le rayon des cellules constituant le squelette ( $R_c$ ) qui peut être déterminé par micrographie. Connaissant les valeurs de ces deux paramètres, nous pouvons ainsi relier les variations de la composante dynamique de contrainte à celles de la dérivée seconde par rapport au temps du gradient de la déformation  $\ddot{F}$ .

### 3 COMPARAISON AVEC DES RÉSULTATS PUBLIÉS

#### 3.1 Données Expérimentales

Afin de déterminer la validité du modèle présenté plus haut, nous nous sommes basés sur des essais menés par Radford et al. (2005). Les auteurs ont réalisé plusieurs essais d'impacts d'une mousse d'aluminium (Alporas®) sur une barre en acier (impact direct). Les échantillons de mousse étaient projetés au moyen d'un canon à gaz à des vitesses allant de 50 m/s à 500 m/s. La pression de contact entre l'échantillon et la barre était mesurée par le biais de jauges de déformation placées sur la barre à une distance d'environ 10 diamètres (285 mm) de la surface impactée.

#### 3.2 Résultats

Afin de simuler les essais présentés plus haut, nous avons mis au point un code monodimensionnel en Fortran 90. La méthode des éléments finis est utilisée pour la discrétisation spatiale des champs de déplacements et de vitesses. L'intégration temporelle est basée sur un schéma aux différences centrées. Supposant que la barre de sortie reste dans sa zone de déformation élastique, nous la modélisons par une condition aux limites en termes d'impédance.

Le calcul de la contrainte dans la mousse se fait selon l'équation (7). Les paramètres de la composante statique ont été identifiés à partir des essais de compression quasi-statique de Radford et al. (2005). La contrainte dynamique incluant les effets de micro-inertie est directement pilotée par le rayon des cellules ( $R_c$ ), que l'on suppose homogène dans l'échantillon, et ne dépend d'aucun autre paramètre ajustable. D'après les auteurs, la taille moyenne des cellules de la mousse utilisée est d'environ 4 mm, ce qui donne  $R_c = 2mm$ .

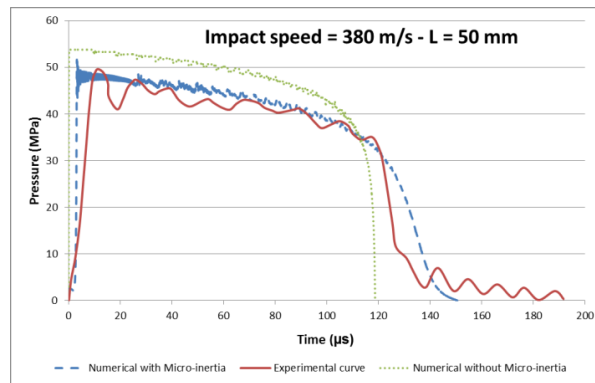


FIG. 2 – Comparaison entre une mesure expérimentale de la pression de contact (courbe rouge) et deux séries de résultats numériques, obtenus avec (courbe bleue) et sans (courbe verte) prise en compte de la micro-inertie. Longueur d'échantillon de 50 mm et vitesse d'impact de 380 m/s

La figure 2 présente une comparaison des résultats expérimentaux et ceux obtenus numériquement avec et sans prise en compte des effets de micro-inertie. La première observation est que les deux simulations reproduisent assez correctement la mesure expérimentale. Néanmoins, la corrélation entre les résultats est meilleure lorsque les effets de micro-inertie sont pris en compte dans la modélisation. Des comparaisons ont également été réalisées entre les données expérimentales et les prévisions numériques pour des vitesses d'impact de 360 et 460 m/s. Dans les deux cas, les conclusions sont les mêmes : inclure les effets de micro-inertie permet un meilleur accord entre les mesures expérimentales et les prévisions numériques.

### 4 CONCLUSIONS

L'ensemble des travaux présentés a pour vocation la modélisation du comportement de mousses métalliques sous des sollicitations hautement dynamiques. Pour y parvenir, un nouveau modèle de comportement a été développé. La caractéristique originale de ce modèle est la prise en compte des effets de micro-inertie induits par l'écrasement rapide des cellules composant la mousse. Les effets de micro-inertie ont été introduits en utilisant une procédure d'homogénéisation dynamique et dépendent de la densité initiale et du rayon des cellules de la mousse ainsi que de la dérivée seconde par rapport au temps du gradient de la déformation.

Des essais d'impacts, sur des mousses d'aluminium à porosités fermées, menés par Radford et al.

(2005) ont été simulés par un code éléments finis monodimensionnel, écrit en Fortran 90. Les paramètres permettant de représenter la mousse ont tous été identifiés à partir de données d'essais indépendants (essai de compression quasi-statique et observations micrographiques des cellules de la mousse). Les simulations ont permis de mettre en évidence une amélioration des prédictions du modèle lorsque les effets de micro-inertie sont pris en compte.

Souhaitant modéliser la mousse soumise à des sollicitations situées dans le régime de la détonique, nous réaliserons des essais à plus hautes vitesses d'impacts afin d'étendre la gamme de validité du modèle. La mousse devant, *in fine*, être utilisée dans des structures complexes, une partie des travaux à venir portera également sur la mise en place des effets micro-inertiels dans un code industriel de dynamique explicite (ANSYS AUTODYN®).

## REFERENCES

- Dannemann K. A., Lankford J., "High strain rate compression of closed-cell aluminium foams", *Material Science and Engineering*, (2000), pp. 157-164.
- Gibson L. J. et Ashby M. F., "Cellular Solids : structure and properties - second edition", *Cambridge University Press*, (1997).
- Molinari A. et Mercier S., "Micromechanical modelling of porous materials under dynamic loading", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49, (2001), pp. 1497-1516.
- Radford D. D., Deshpande V. S. et Fleck N. A., "The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure", *International Journal of Impact Engineering*, 31, (2005), pp. 1152-1171.
- Romero P. A., Soboyejo W. O. et Cuitiño A. M., "Modeling of Dynamically Loaded Open-Cell Metallic Foams : Yielding, Collapse, and Strain Rate Effects", *Journal of Applied Mechanics*, 77, (2010)
- Zhao H., Elnasri I. et Abdennadher S., "An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, (2005), pp. 757-774.