



**HAL**  
open science

# Flambage Plastique Multiaxial de Mousses d'Aluminium Avancées

Rachid Baleh, Solomon Huluka, Akrum Abdul-Latif, Ibrahim Deieb, Khalil  
Khanafer

► **To cite this version:**

Rachid Baleh, Solomon Huluka, Akrum Abdul-Latif, Ibrahim Deieb, Khalil Khanafer. Flambage Plastique Multiaxial de Mousses d'Aluminium Avancées. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280042

**HAL Id: hal-04280042**

**<https://hal.science/hal-04280042>**

Submitted on 10 Nov 2023

**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.

# FLAMBAGE PLASTIQUE MULTIAXIAL DE MOUSSES D'ALUMINIUM AVANCEES

**R. BALEH<sup>a,b</sup>, A. ABDUL-LATIF<sup>a,c</sup>, S. HULUKA<sup>a</sup>, I. DEIEB<sup>e</sup> et K. KHANAFER<sup>f</sup>**

**a.** Laboratoire Quartz SUPMECA, site IUT de Tremblay UP8, 3, rue Fernand Hainaut, 93407 St- Ouen Cedex, France, Email: solbayu2008@gmail.com

**b.** GARAC - Ecole Nationale des Professions de l'Automobile, 3 Bd Gallieni, 95100 Argenteuil, France, Email: rbaleh@garac.com

**c.** Université Paris 8, IUT de Tremblay, 93290 Tremblay-en-France, France, Email: abdul-latif@iu2t.univ-paris8.fr

**e.** Engineering University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, Email: ideiab@uoguelph.ca

**f.** Mechanical Engineering Department, Australian College of Kuwait, Kuwait City, Kuwait Email: k.khanafer@ack.edu.kw

## Résumé :

*La présente investigation, à caractère expérimentale, porte sur des éprouvettes pleines à section carrée en mousse d'aluminium, en vue de comprendre leur comportement mécanique sous **flambage plastique complexe**. L'accent est mis sur l'effet de la nature cellulaire du matériau en utilisant 2 types de mousse d'aluminium de porosités 80% et 85%, intitulées **FP80** et **FP85**. Ainsi, outre l'écrasement uniaxial de référence, 4 configurations biaxiales classées en 2 modes : **Bi37°**, **Bi45°** (modéré) **Bi53°** et **Bi60°** (sévère), sont testées sous une vitesse quasistatique de 5 mm.mn<sup>-1</sup>, moyennant l'usage d'un banc d'essai breveté, dénommé **ACTP**. Les résultats récoltés avancent clairement, en parfaite corrélation avec la densité d'origine, que plus la complexité de chargement augmente, plus la résistance, la densification et l'énergie absorbée s'amplifient. Le gain d'énergie par rapport à l'uniaxial, pour la nuance de mousse la plus dense **FP80**, en faveur du **mode sévère**. C'est donc le cas le plus complexifié et la mousse la plus dense qui se révèle le meilleur système d'absorption d'énergie (**SAE**).*

## Abstract:

*The present investigation, of an experimental nature, concerns solid square-section aluminium foam specimens, in order to understand their mechanical behaviour under complex plastic buckling. The emphasis is put on the effect of the cellular nature of the material by using 2 types of aluminum foam of 80% and 85% porosity, entitled **FP80** and **FP85**. Thus, in addition to the reference uniaxial crushing, 4 biaxial configurations classified in 2 modes : **Bi37°**, **Bi45°** (moderate) **Bi53°**, **Bi60°** (severe), are tested under a quasistatic speed of 5 mm.mn<sup>-1</sup>, by a patented test bench, named **ACTP**. The results clearly show, in perfect correlation with the original density, that as the complexity of the loading increases, so does the resistance, the densification and the absorbed energy. The energy gain compared to uniaxial, for the densest foam grade **MP80**, in favor of the severe mode. It is therefore the most complex case and the densest foam that proves to be the best energy absorption system (**SAE**).*

**Mots clés : Mousse d'aluminium, Chargement Complexe, ACTP et SAE.**

# 1 Introduction

La tendance actuelle sur le choix des matériaux industriels se dirige d'un côté, vers l'allègement des structures afin de minimiser la consommation d'énergie tout en optimisant les propriétés mécaniques et la durabilité et de l'autre, vers leur multifonctionnalité combinant par exemple, de bonnes propriétés mécaniques à des fonctionnalités diverses telles que, l'isolation thermique et acoustique, la conductivité électrique, ou encore des compromis tels que ductilité et résistances mécaniques pour la sécurité ou le blindage sécuritaire par exemple. Ainsi, dans le cas des SAE particulièrement, un intérêt croissant est accordé aux structures cellulaires telles que les mousses ou les cellules en nids d'abeilles qui s'accompagnent d'une diversité des mécanismes de physiques dissipatifs d'énergie (gonflement, frottement, rupture, flexion ou torsion plastique, flambage plastique, etc.). Et dans ce cadre, plusieurs travaux de recherche sont déjà consacrés aux différents matériaux cellulaires utilisés comme systèmes d'absorption d'énergie. Selon la littérature, les matériaux cellulaires de par leurs usages, se répartissent en trois grandes familles : les mousses polymériques, les mousses métalliques et les matériaux naturels Gibson *et al.* (1997). Caractérisée principalement par le couple densité/porosité, le choix de telle ou telle mousse, pour tout concepteur, impose de bien connaître le comportement du matériau sous diverses vitesses de déformation et à différentes températures. Ainsi, selon différentes sources, ce dernier critère (effet de la température) avec celui de la compatibilité avec les matériaux des systèmes tubulaires destinées au bourrage dans le cas des composites, constituent la différence fondamentale entre les différentes mousses utilisées. En ce qui concerne les mousses métalliques telles que celles à base d'alliages légers non-ferreux, comme les alliages d'aluminium qui nous intéressent ici, elles sont largement utilisées en tant que système d'amortissement contre les chocs, Ashby *et al.* (2000). Il est utile de rappeler que la combinaison peut concerner deux ou plusieurs matériaux, qui peuvent être de natures différentes, à l'image des tubes simples ou enrobés d'un composite et remplis de mousse. Cette dernière catégorie est obtenue par arrangements et combinaisons de diverses sections concentriques, avec ou sans mousse intermédiaire. L'état de l'art révèle jusqu'à récemment encore plusieurs recherches parmi lesquelles, Marchi *et al.* (2001), portant la réponse des mousses métalliques comme accessoires d'absorbeur d'énergie, elles demeurent toutefois assez rares, voire inexistantes pour les conditions extrêmes de charges multiaxiales comme envisagées ici, Gioux *et al.*, (2000). Enfin, le besoin sans cesse d'optimiser toujours plus les performances des SAE par exemple et d'améliorer la sécurité, nécessite que l'on ait une connaissance plus approfondie encore de la relation entre les propriétés et la microstructure. Par ailleurs, le comportement des matériaux cellulaires en compression s'avère remarquable comparé à leur densité relative Amsterdam *et al.* (2008). Ils montrent une grande capacité d'absorption d'énergie. De ce fait, cette investigation (thèse en cours, S. Huluka) a pour but d'approcher de près le comportement mécanique réel en régime quasistatique de chargement complexes, jamais abordées jusque-là sous de telles conditions pour une mousse de nouvelle génération. Ainsi, c'est le cadre expérimental, du chargement biaxial à travers la philosophie de l'effet de la complexification du trajet de chargement développé dans nos précédentes investigations sur des SAE tubulaires qui est adopté ici, qui en constitue donc le centre d'intérêt. En effet, des études menées sur des tubes métalliques cylindriques et carrés, Baleh (2004), Abdul-Latif et Baleh (2005), Baleh et Abdul-Latif (2007), ont déjà montré un gain d'énergie substantiel pour plusieurs métaux (cuivre, aluminium et acier) et différentes géométries, et récemment encore sur de la mousse d'aluminium avancée, Abdul-Latif *et al.* (2021). En définitive, l'originalité de cette étude réside donc dans la caractérisation du comportement mécanique à travers notamment la capacité dissipatrice de structures cellulaires sous chargement biaxial, formées d'une mousse alvéolée avec différentes porosités, et sous divers degrés de complexité. Elle s'inscrit en droite ligne des grands efforts portant sur la caractérisation expérimentale du comportement de la mousse dans les conditions

extrêmes. Celle-ci servant de BDD expérimentale pour une seconde thèse en cours (K. Kemal) portant sur la mise au point d'une modélisation par EF du comportement mécanique de cette mousse sous chargements complexes multiaxiaux et conclure quant à l'importance d'un bon couplage densité/complexité pour des conceptions industrielles notamment.

## 2 Choix du matériau cellulaire et protocole expérimental

### 2.1 Echantillons en mousses d'aluminium

Le matériau utilisé ici est une mousse d'aluminium de dernière génération dont la composition du métal de base est donnée par le tableau 1. Elle est dotée d'une structure avec une architecture uniforme et des pores sphériques de 11mm de diamètre. Les spécimens, de section carrée ont des dimensions normalisées : 63mm x 63mm x 110mm.

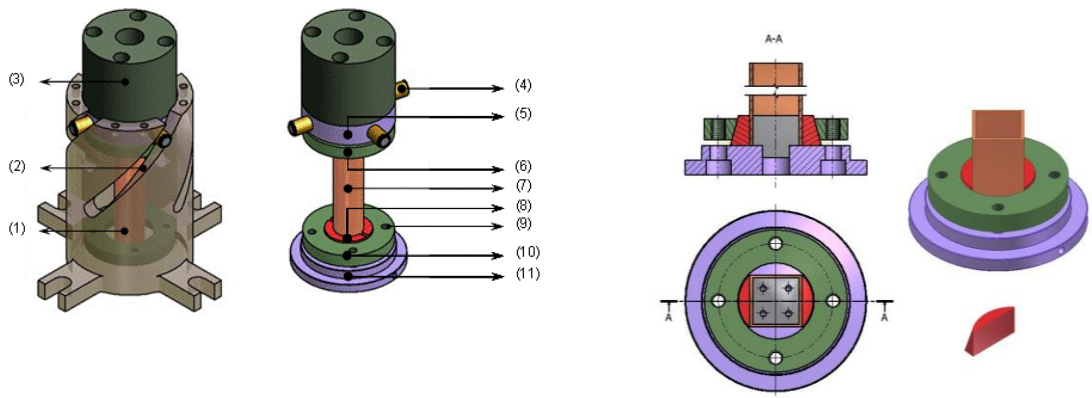
Eléments	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Ni	%Zn	%Ti
AS7G06	6.7-7.3	<0.14	<0.04	<0.09	0.5-0.6	<0.04	<0.09	0.08-0.12

Tableau 1: composition chimique du métal de base de la mousse utilisée (AS7G06).

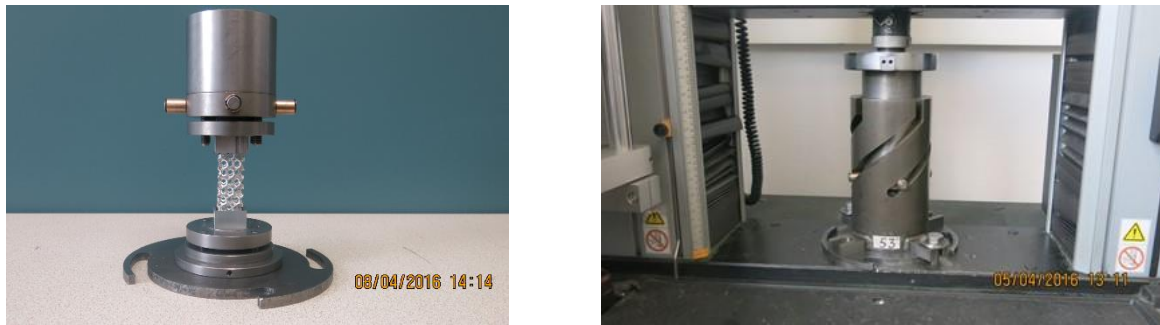
Pour annihiler l'effet de serrage des échantillons, un choix judicieux de rendre chaque éprouvette plus rigide au niveau des extrémités de fixation a été opéré, c'est pourquoi elles ont été enrobées par de la résine époxy afin de remplir les alvéoles et de renforcer ainsi leur rigidité au niveau des extrémités.

### 2.2 Mode opératoire et technique d'assemblage

Afin d'aborder ce travail, on teste en premier lieu une structure tubulaire pleine et alvéolée n'ayant subi aucun traitement particulier, que l'on considérera comme structure de référence soumise à une compression uniaxiale en régime quasistatique et en biaxiale en faisant appel à un dispositif spécifique intitulé ACTP, mis au point au sein de notre laboratoire. Il s'agira en suite de comparer la force moyenne et l'énergie dissipée par flambage par les différents échantillons de mousse ainsi écrasés tout en analysant l'évolution de la structure avant et après flambage. La campagne d'essais est réalisée sur une machine de traction-compression universelle de type Instron 5582, supplée par le dispositif ACTP pour les 4 configurations biaxiales Bi37°, Bi45° (**mode modéré**) Bi53° et Bi60° (**mode sévère**). Des conditions expérimentales identiques sont systématiquement employées, notamment, une même vitesse d'écrasement de 5 mm/min. L'écrasement des structures s'effectuant comme d'usage sur ce type de machine, entre deux plateaux de la machine par un déplacement de haut vers le bas du plateau mobile supérieur. Le protocole de cette campagne d'essais se résume entre trois et/ou cinq essais répétitifs, qui sont réalisés systématiquement pour chaque configuration. La deuxième est rendue nécessaire par toute dispersion dépassant 5 %.



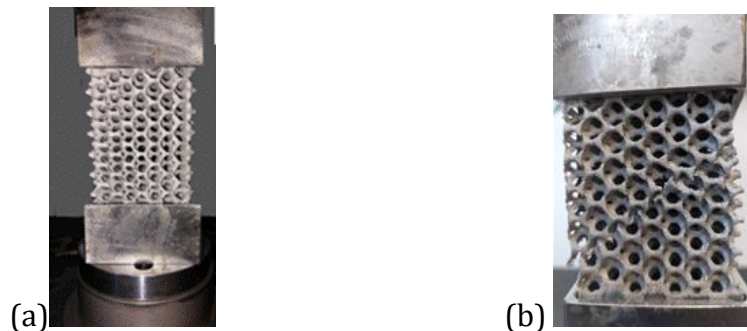
**Fig.1** Schéma de principe pour un écrasement de structures carrées en mode biaxial : (a) Vue extérieure de l'ACTP avec spécimen cylindrique prêt au flambage biaxial ; (b) partie active de l'ACTP induisant la sollicitation biaxiale du spécimen et (c) systèmes de fixation des extrémités d'un spécimen carré.



**Fig.2** : Exemples typiques de configurations : (a) début de flambage modéré en  $Bi0^\circ$  ; (b) sous écrasement biaxial sévère, en phase terminale en  $Bi53^\circ$ .

### 3 Parmi les résultats ciblés

#### 3.1 Le mécanisme d'écoulement plastique



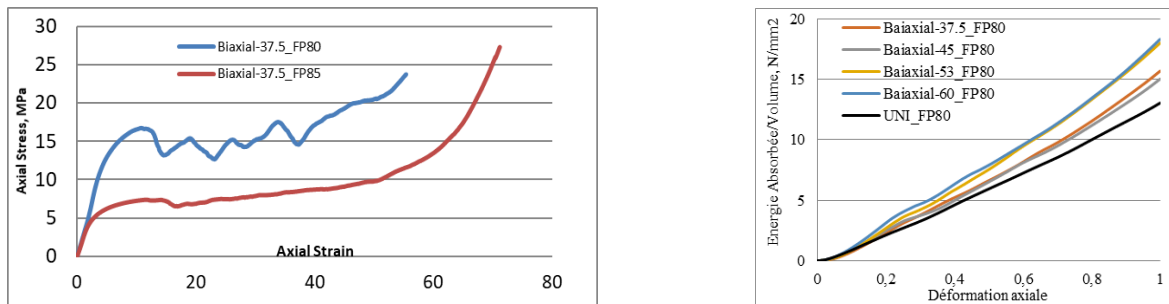
**Fig.3** : Tests de flambage : (a)- démarrage uniaxial et (b)- résultat d'un test biaxial sévère  $Bi60^\circ$ .

L'écoulement plastique génère un mode de déformation qui se caractérise ici un compactage des cellules, s'accompagnant d'une densification avec formation des bandes d'effondrement, distribuées de manière aléatoire et selon un plan incliné à  $45^\circ$  comme le montre fig.5. Bien sûr, ces plans de rupture sont largement accentués par le degré de complexité du chargement.

#### 3.1 Sur les deux grandeurs mécaniques évoquées ici

Conformément à la littérature, la fig.4 révèle des courbes contrainte-déformation typiques d'un matériau cellulaire et montre 3 phases : (i) une zone de contrainte élastique linéaire faible ; (ii) une zone plateau de contrainte presque constante ; et (iii) une de densification, de contrainte en forte augmen. Aussi, il est largement connu que l'augmentation de la fraction volumique de la porosité de la mousse joue un rôle important dans la diminution des propriétés mécaniques (limite d'élasticité, plateau de contrainte et déformation de densification) et de la capacité d'absorption d'énergie. Comme attendu, la fig.4 ci-dessus décrivant l'évolution de la contrainte de flambage en fonction de la course pour une configuration  $Bi37^\circ$ , avance l'importante influence de la complexité de la charge en couplage avec la nature matériau, définie ici par le critère de densité qui différencie les deux mousses, sur le comportement en flambage plastique des échantillons. Comme le confirme bien la fig.5 pour la mousse FP80, affichant une comparaison des énergies absorbées en fonction de la complexité. Elle montre une résistance nettement plus intéressante pour les cas les plus complexifiés. Par ailleurs, l'énergie absorbée se comporte de manière quasi-linéaire en uniaxial, alors que l'évolution devient non-linéaire en biaxial. Il est aisé de conclure que sur l'absorption d'énergie spécifique par unité de volume, ce sont les deux trajets de chargement du mode sévère qui dissipent l'énergie la plus élevée. Il en est de même pour la FP85 non révélé ici. Néanmoins, il y a lieu de préciser, idem pour la mousse FP85, qu'il n'y a pas de différence significative des énergies enregistrées sous les chargements  $Bi53^\circ$

et Bi60°. De même, un comportement similaire a été observé sous les chargements modérés Bi37° et Bi45° sur d'autres résultats. De ce fait, on peut conclure que, plus la complexité de la charge est élevée, plus l'énergie absorbée est importante. Cela est sûrement dû à la prédominance du mécanisme de déformation plastique centré autour d'émergence de rotules plastiques, plutôt que sur celui de l'endommagement qui affecte les entretoises des cellules poreuses et qui s'accompagne d'une densification exponentielle de la mousse en phase finale. Enfin, on peut avancer aussi que le couplage densité/complexité joue un rôle primordial dans le comportement mécanique de ces mousses.



**Fig.4 :** Illustration l'influence de la complexité du chargement et de la densité de la mousse sur les courbes charge-déplacement et celle l'énergie dissipée, sous la vitesse quasistatique de 5mm/min.

## 4 Conclusion

Cette étude a permis de prouver la sensibilité d'une mousse d'aluminium de nouvelle génération au trajet de chargement par flambage plastique quasistatique. En effet, en complexifiant le chargement via l'ACTP, les échantillons écrasés affichent alors une meilleure absorption d'énergie. L'état de concentration de contrainte généré par la sollicitation se traduit par la composition de sollicitations de compression, flexion et de cisaillement, agissant simultanément sur les entretoises des pores et conduisant à un changement intrinsèque du comportement mécanique avéré. Les configurations biaxiales abordées, réparties en deux modes de sollicitation : modérée (Bi37° et Bi45°) et sévère (Bi53° et Bi60°) ont montré un net avantage en faveur du mode sévère pour les deux types de mousse.

## Références

- [1] L.J. Gibson, M.F. Ashby, Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [2] G. Gioux, T.M. McCormack, L.J. Gibson, Failure of aluminium foams under multiaxial loads, Int. J. Mech. Sci. 421097–1117, 2000.
- [3] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, Metal foams: A design guide, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] C. San Marchi, A. Mortensen, Deformation of open-cell aluminum foam, Acta Mater. 49 3959–3969, 2001.
- [5] Baleh R., these, flambage plastique quasistatique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe - SAE- via un nouveau dispositif Expérimental, UTT, 2004.
- [6] E. Amsterdam, J. Dehosson, P. Onck, On the plastic collapse stress of open-cell aluminum foam, Scr. Mater. 59 653–656, 2008.
- [7] A. Abdul-Latif, R. Baleh, 2005, shock absorbing device comprising a plastically-deformable member, INPI, (PCT/FR05/00391) France, expanded internationally under (WO 2005090822).
- [8] R. Baleh, A. Abdul-Latif, uniaxial-biaxial transition in quasi-static plastic buckling used as an energy absorber, ASME, J. Appl. Mech. 74 628–635, 2007.
- [9] Abdul-Latif, A. Menouer, R. Baleh and I. M. Deiab, plastic response of open cell aluminum foams of highly uniform architecture under different quasi-static combined biaxial compression-torsion loading paths, Materials Science and Engineering B 266 115051, 2021.