

## Chapitre VI

### Mousses ou solides cellulaires

Les mousses ou les matériaux alvéolaires résultent de la volonté d'introduire de façon maîtrisée une certaine proportion de vides dans le but :

- D'augmenter la souplesse : mousses pour l'ameublement ;
- D'améliorer le caractère isolant, thermique ou phonique : mousses pour le bâtiment ;
- De rendre le matériau amortissant : mousses d'emballage ;
- D'alléger le matériau en lui conservant ses propriétés structurelles.

Les matériaux alvéolaires sont constitués d'un squelette de matériau entourant des alvéoles fermés ou partiellement ou totalement ouverts sur les alvéoles voisins ou sur l'extérieur.

#### Définitions :

**Alvéole** : nm ; petite cavité élémentaire entourée complètement ou partiellement par une paroi

**Cellule ou alvéole fermé** : totalement clos par sa paroi → ne communiquant pas avec d'autres alvéoles ou avec l'extérieur.

**Pore ou alvéole ouvert** : non totalement clos par sa paroi

**Matériau poreux ou spongieux** : matériau dans lequel la majorité des alvéoles sont des pores qui communiquent entre eux à travers toute la masse, ainsi qu'avec l'extérieur.

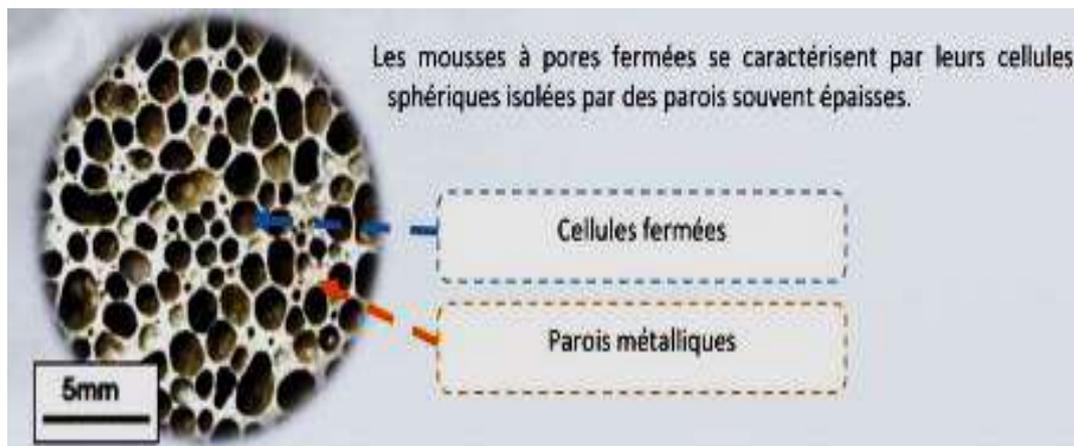
## I. Types de mousses

### a) *Mousses à pores fermés*

Les mousses sont généralement fabriquées par injection d'un gaz inerte ou mélange d'un agent moussant dans un matériau liquide.

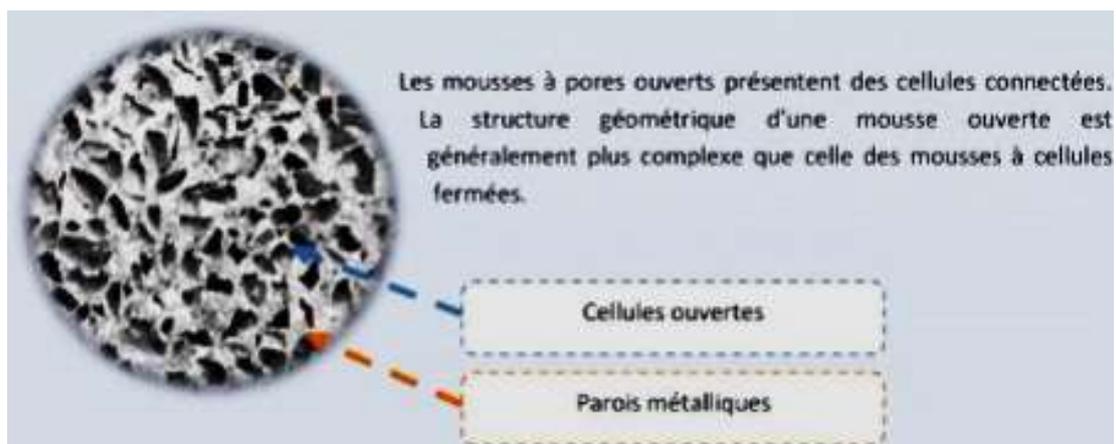
Elles sont principalement utilisées comme un matériau absorbant l'impact ; les matériaux métalliques comme les polymères mais avec un chargement plus élevé.

Les mousses métalliques contrairement aux polymères, elles restent déformées après l'impact.



### b) *Mousses à pores ouverts*

Appelées aussi éponges peuvent être fabriquées par plusieurs voies, notamment la fonderie ou la métallurgie de poudre. Elles sont utilisées comme échangeurs de chaleur compacte, d'absorption d'énergie. Elles sont dans des technologies pointues comme l'aérospatiale, la fabrication, la construction...



### **c) Mousses stochastiques**

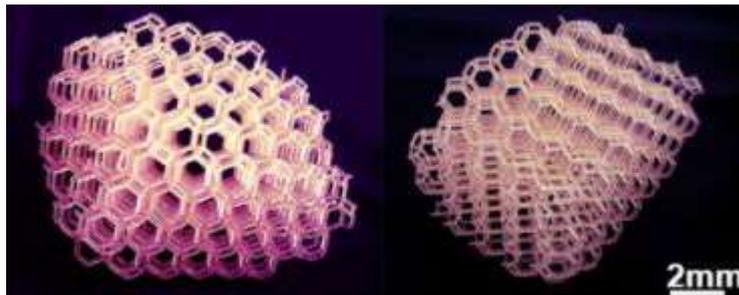
Une mousse est dite stochastique lorsque la répartition des porosités est aléatoire.

La majeure partie des mousses sont stochastiques car leur fabrication relève soit :

- Des procédés de moussage qu'il soit liquide ou solide (poudre)
- Du moulage d'un moule contenant des billes ou une matrice elle-même aléatoire.

### **d) Mousses régulières**

Une mousse est dite régulière lorsque la structure est ordonnée. La méthode existante est celle du moulage par fonderie (des plaques en sable sont utilisées comme noyaux) leur forme est étudiée pour chaque application.



## **II. Techniques de Fabrication**

### **a) Pores fermés** (Fonderie et métallurgie des poudres. Fonderie Injection de gaz)

Ce procédé est majoritairement utilisé par insertion des particules insolubles (ou à lente dissolution) comme les particules de carbure de silicium (SiC), d'oxyde d'aluminium ou encore d'oxyde de magnésium. Cet ajout permet d'augmenter la viscosité du métal en fusion et ainsi permettre la solidification de la mousse.

Généralement on utilise de l'air pour créer les bulles mais on peut également se servir de dioxyde de carbone, d'oxygène, d'un gaz inerte ou même d'eau. On peut effectuer du calandrage afin de dimensionner la pièce obtenue (méthode semblable à l'extrusion). Le diamètre des pores obtenus peut varier de 0,5 à 5mm.

### ***b) Pores ouverts***

De nombreux procédés de fabrication permettent de fabriquer des mousses polymères à cellules ouvertes avec de faibles densités relatives. L'une d'elle est la fabrication par procédés d'infiltration. Ce procédé se déroule de la façon suivante :

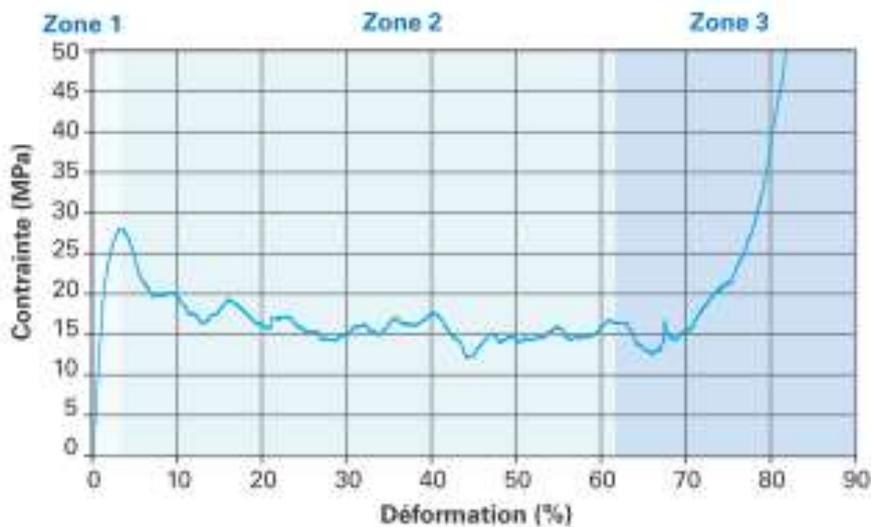
Premièrement, on crée un polymère possédant la forme, la taille des cellules et la densité désirée. Ce polymère servira de master pour la mousse métallique que l'on va synthétiser. Ce polymère est ensuite revêtu d'un mortier (boue, sable...) afin de créer un moule avec une image inversée de la future mousse métallique. Ce moule est ensuite placé dans un four. Grâce à la température importante, le polymère va se décomposer et libérer le moule. Ensuite le moule est rempli d'un alliage métallique puis refroidit. Après refroidissement, le mortier est retiré par friction (chocs) pour ne laisser que la mousse métallique qui est la réplique parfaite de la mousse de polymère initiale. Ce procédé simple permet aussi l'utilisation de poudres métalliques et d'obtenir des mousses métalliques à cellules ouvertes avec des tailles de pores de 1 à 5mm. Aussi grâce à cette méthode, un grand nombre de métaux peuvent être utilisés ce qui permet de créer une grande variété de mousses métalliques.

## **III. Les propriétés mécaniques des mousses**

Sont étroitement dépendantes de leurs structures elles-mêmes tributaires des procédés de fabrication (stochastique ou régulière) à pores ouverts ou fermés.

### **A. Compression et absorption d'énergie**

Le comportement des mousses est intimement lié à la courbe de compression (Fig. 1), très caractéristique, qui représente un plateau de déformation à contrainte constante et autorise une utilisation pour l'absorption d'énergie.



**Figure 1** : Courbe de compression type d'une mousse métallique

Pour l'usage d'une mousse métallique en absorption d'énergie (crash), la valeur de contrainte plateau reste la caractéristique la plus importante puisqu'elle pilote l'énergie absorbable pour un volume de mousse donné. Cette valeur est généralement exprimée en fonction de la nature et de la densité de la mousse, souvent sur la base d'essais de compression.

### B. Effet de la structure (ouverte ou fermée)

Pour un même matériau, la structure de la mousse influe sur le comportement en compression. Les structures fermées (mousses) présentent généralement des valeurs supérieures à celles ouvertes (éponges). La valeur de contrainte du plateau reste pilotée principalement par la densité relative de la mousse.

$$\sigma_p = 0.3\sigma_{ys} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \text{ avec } m = 1,6$$

$\sigma_p$  : Valeur de contrainte du plateau

$\sigma_{ys}$  : Valeur de contrainte limite élastique en compression du matériau de base

$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m$  : Densité relative de la mousse

### C. Effet de la nature du matériau

Le matériau constitutif de la mousse influe fortement sur le type du comportement, fragile ou ductile, ainsi que sur les caractéristiques attendues. De plus, pour des structures anisotropes, le sens de la compression impacte également les caractéristiques en compression. Ces tendances sont présentées en figure 2 avec l'illustration du comportement fragile (alliage AlSi7Mg) ou élastoplastique (acier inoxydable 304L et aluminium pur), ainsi que l'effet de l'anisotropie sur deux directions pour l'acier 304L.

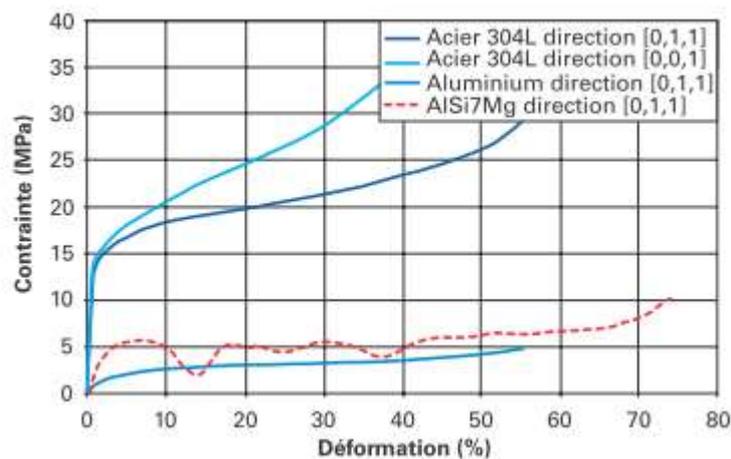


Figure 2 : Influence du matériau, et de la direction de compression

### D. Effet de la taille et la forme des cellules

La variation de taille des cellules stochastiques à structure ouverte a une incidence sur le comportement en compression. L'augmentation de la taille des cellules conduit à :

- Des variations plus importantes de la valeur plateau lors de la compression, pour un matériau de type fragile ;
- Valeur du pic plus élevée, en début de compression ;
- Valeur du plateau plus basse.

### E. Effet de la vitesse de sollicitation

Négligeable dans le cas des mousses légères à structure fermée jusqu'à des vitesses de déformation de  $50s^{-1}$ , la vitesse de sollicitation peut devenir très sensible dans le cas de structures ouvertes plus denses comme l'illustre la figure 3. L'évolution entre une compression quasistatique, à une vitesse de  $1mm.s^{-1}$ , et un crash, à une vitesse de  $7,5m.s^{-1}$ , se traduit, pour une même mousse d'aluminium de porosité relative de 70 %, par une élévation de la valeur du plateau. La quantité d'énergie absorbée (aire sous la courbe) reste la même. La déformation observée est moins importante et la valeur de plateau plus élevée.

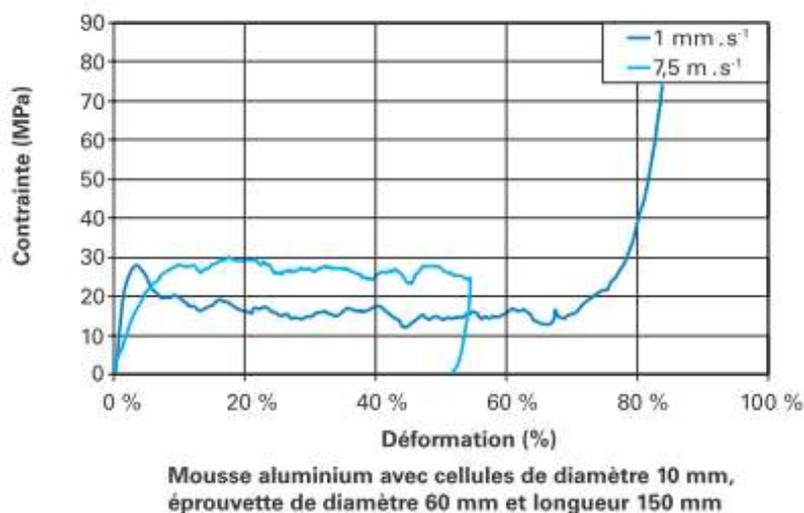


Figure 3 : Evolution des courbes entre compression isostatique et crash

### Caractéristiques clés

L'aluminium est logiquement le matériau le plus souvent utilisé, du fait de sa relative facilité de mise en forme pour réaliser la mousse métallique. Des fabricants de mousse de nickel font également état de l'emploi de leurs produits en absorption d'énergie. Enfin, l'acier, bien que plus difficile à mettre en œuvre, est un matériau très intéressant du fait de son comportement ductile et de sa valeur plateau élevée.

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques, nécessaires pour un dimensionnement en crash, de plusieurs mousses métalliques utilisables. Ces informations sont issues de publications ou fournies par les fabricants.

Plus généralement, les caractéristiques mécaniques de la mousse sont données par rapport au matériau constitutif de base et à la densité relative du matériau. Outre la valeur plateau  $\sigma_p$  définie précédemment, on peut retenir pour les valeurs du module d'élasticité  $E$ , du module de cisaillement  $G$  et du coefficient de Poisson  $\nu$  :

$$E \approx \alpha_2 E_s * (\rho/\rho_s)^n ;$$

$$G \approx 3/8 * \alpha_2 G_s * (\rho/\rho_s)^n ;$$

$$\nu \approx 0,3$$

où n a une valeur comprise entre 1,8 et 2,2, et  $\alpha_2$  entre 0,1 et 4, ces valeurs dépendant de la structure de la mousse.

**Tableau 1 – Caractéristiques clés des principales mousses métalliques**

Matériau	Densité relative	Rp0,2 mousse (en MPa)	Valeur plateau (en MPa)	Module d'Young E (en GPa)
Acier 304L	0,15	11	20	6,8
Al	0,09	1,6 - 1,8	2,3	0,4 - 1
Al	0,1 - 0,35	2 - 20	1,9 - 14	1,7 - 12
Al	0,05 - 0,1	0,9 - 2,7	0,9 - 3	0,06 - 0,3
Al	0,06	-	0,9	0,01
Al	0,22 - 0,32	-	9	-
Al	0,15	1,2	3,5	0,14
Al Si7Mg	0,3	22	17	1,5
Al Si7Mg	0,15	3,5	5	0,4
Al SiC	0,02 - 2	0,04 - 7	0,04 - 7	0,02 - 2
Al SiC	0,2 - 0,4	-	1,5 - 2	-
AlMg1SiCu	0,2	-	12	-
AlSi6Cu4	0,14 - 0,2	-	9,5 - 24	-
AlSi6Cu4	0,125	-	10,8	-
Ni	0,03 - 0,04	0,6 - 1,1	0,6 - 1,1	0,4 - 1
Ni (nano)	0,022	-	3,9	-
Ta	0,2	-	50	1,5 - 3
Ti	0,33	-	157	1,9

## Choc balistique

### a) Matériaux employés

Les mousses métalliques sont utilisées en balistique, généralement sous forme de composites intégrant des mousses d'aluminium à pores fermés sont composées d'une âme en mousse entourée de feuilles plus résistantes, souvent en acier, présentent des possibilités intéressantes pour les applications pare-balles. Une structure de ce type permet, à masse égale, des performances supérieures à celles qu'offre une plaque monolithique.

Dans ce domaine d'application, les mousses métalliques sont également utilisées comme absorbeur d'énergie cinétique, elles entrent donc également en compétition avec les structures à base de nids d'abeille. L'objectif final est de déterminer quelle est la structure sandwich qui apporte le meilleur gain par rapport aux plaques monolithiques entourant l'âme. Les études comparatives mettent en évidence, que, pour de faibles épaisseurs de plaques externes, la mousse plus ductile est significativement supérieure à la mousse plus cassante. Dans la compétition avec les structures en nid d'abeille, seule la mousse plus ductile prend le dessus.

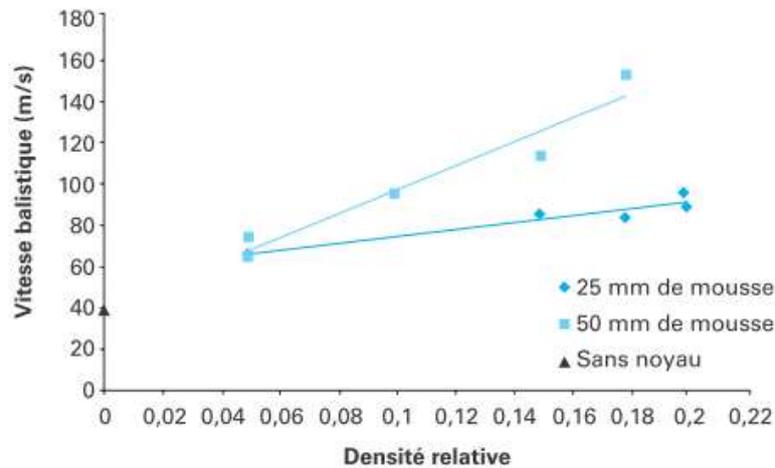
Le ratio d'enfoncement considère, au regard de l'enfoncement mesuré, une plaque monolithique en acier de masse équivalente à celle du sandwich mis en œuvre.

Enfin, ces structures sandwichs doivent faire face à de nombreuses autres solutions composites plus ou moins conventionnelles (fibres synthétiques, mousses polyuréthane, fibres de verre...).

- *Caractéristiques clés*

Comme il s'agit d'une structure composite, c'est l'ensemble du sandwich qui est considéré. Dans la structure composite, la mousse métallique a pour objet d'absorber tout ou partie de l'énergie cinétique du projectile.

& Les matériaux les plus répandus sont constitués de tôles d'acier ou d'alliage d'aluminium, d'épaisseur millimétrique variable, et de mousses métalliques d'épaisseur centimétrique et de densité relative variables.



**Figure 4 :** Courbes indiquant l'influence de la densité relative sur la limite balistique du composite pour différentes épaisseurs

La figure 4 montre l'incidence de l'épaisseur de l'âme en mousse sur la limite balistique d'un projectile (vitesse minimale à atteindre pour perforer la structure). Les composites testés sont composés de deux tôles de 0,6 mm d'alliage d'aluminium (type AlMg1) collées sur une mousse de densité relative 0,18 correspondant à une porosité de 82 %.

& Le comportement réel du matériau sandwich lors d'un impact balistique est complexe, car il est fonction de la morphologie et de la composition du composite, mais également des caractéristiques de l'impact. On peut schématiquement résumer les paramètres influents par :

– Propriétés sandwich :

- matériau mousse (mousses d'aluminium, autres) ;
- épaisseur mousse ;
- liaison mousse/tôle (moulée, collée, plaquée, etc.) ;
- précontraintes imposées aux tôles externes.

Propriétés impact :

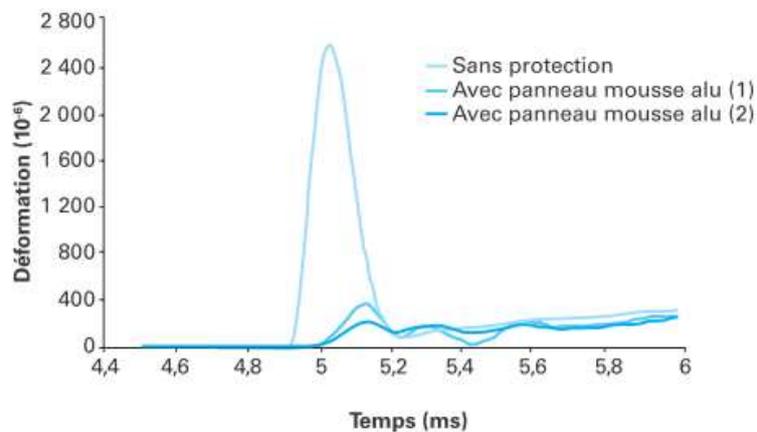
- énergie du projectile (vitesse et masse) ;
- forme (conique, hémisphérique, plat).

**b) Matériaux employés**

On retrouve ici, comme en balistique, des composites de même nature qu'évoquée précédemment. Les études menées sur ces matériaux indiquent de bonnes propriétés d'absorption de l'âme en mousse qui limite fortement les déformations. La figure 5 montre l'efficacité d'une protection en mousse d'aluminium de 50mm d'épaisseur.

Les paramètres qui pilotent la pression résiduelle transmise aux structures protégées par ces sandwichs sont :

- l'épaisseur de mousse et sa densité ;
- les propriétés de la tôle du sandwich ;
- l'existence de multicouches de mousses dans la structure.



**Figure 5 :** Déformations induites par une explosion sur panneaux avec et sans protection