

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie Mécanique  
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الميكانيكية  
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Doctorat en sciences**  
**Génie Mécanique**  
Option : Génie Mécanique

## Elaboration et caractérisation d'une mousse métallique

Présentée par :

**FITES Djamal**

Soutenue publiquement le : / /2023

**Devant le jury composé de :**

Pr. MOUMI NOUREDDINE	Professeur	Président	Université de Mohamed Khider - Biskra
Pr. BOUMERZOUG Zakaria	Professeur	Directeur de thèse	Université de Mohamed Khider - Biskra
Pr. BENMOUSSA Hocine	Professeur	Examineur	Université de Batna 2 - Mostefa Benboulaïd
Dr. KADDOURI Wahid	M.C.A	Examineur	Université de Batna 2 - Mostefa Benboulaïd

# Remerciements

Louange à notre Seigneur, qui nous a dotés de la merveilleuse faculté de raisonnement.

Je remercie vivement mon encadreur, professeur **BOUMERZOUG Zakaria** qui m'a proposé ce thème de recherche et aussi sa disponibilité durant toutes ces années universitaires.

Je remercie le président de jury, Mr. **MOUMI Noureddine**, Professeur à l'université de Mohamed Khider - Biskra, qui a accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie Mr. **BENMOUSSA Hocine**, Professeur à l'université de Batna 2 - Mostefa Benboulaïd et Mr. **KADDOURI Wahid**, Maître de conférences à l'université de Batna 2 - Mostefa Benboulaïd, qui ont accepté d'examiner ce modeste travail de recherche et d'avoir accepté la participation au jury .

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail.

# Dédicaces

*Je dédie ce travail de thèse de doctorat à mes parents, que Dieu leur fasse miséricorde*

*Je le dédie aussi à mon épouse qui m'a toujours soutenu, mes chers enfants et toute ma famille et mes amis, je tiens à remercier tout le monde : Bobeche R, Bougriou Ch, Ben Nouioua H, Darar A/W et Rezgui F et Touati L pour les services qu'ils m'ont rendus*

## ملخص

إن هذه الدراسة كرسست لتطوير صناعة رغوة الألومنيوم ذات الخلايا المفتوحة بطريقة التسلل و قد تم دراسة خصائصها الهيكلية ، الميكانيكية وخصائصها الحرارية (أداء النقل الحراري). كما تم دراسة انتقال الحرارة عددياً وتجريبياً. وقد أظهرت النتائج تأثير حجم الخلية (المسام) على الخصائص الميكانيكية و الحرارية.

**الكلمات الرئيسية:** رغوة الألومنيوم ذات الخلايا المفتوحة ، عملية التسلل ، المسامية ، الخصائص الميكانيكية ، الخصائص الحرارية ، انخفاض الضغط .

## Abstract

This study is devoted to the elaboration by infiltration of metallic aluminum foam with open cells. The metallurgical (macrostructures, mechanical) and energy (heat transfer performance) properties were studied. Heat transfer has been studied numerically and experimentally. The results obtained showed the effect of cell size (pores) on the mechanical and heat transfer properties of the manufactured material.

**KEYWORDS:** Open-cell aluminum foam, Infiltration process, Porosity, Mechanical properties, Thermal properties Heat transfer, Pressure drop.

## Résumé

Cette étude est consacrée à l'élaboration par infiltration d'une mousse métallique en aluminium à cellules ouvertes. Les propriétés métallurgiques (macrostructures, mécaniques) et énergétiques (performances de transfert de chaleur) ont été étudiées. Le transfert de chaleur a été étudié numériquement et expérimentalement. Les résultats obtenus ont montré l'effet de la taille des cellules (pores) sur les propriétés mécaniques et énergétiques du matériau fabriqué.

**MOTS CLÉS :** Mousse d'aluminium à cellules ouvertes, Processus d'infiltration, Porosité, Propriétés mécaniques, Propriétés thermiques, chute de pression.

# SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Description microstructurale.....	5
1.3 Les différents types de mousse.....	6
1.3.1 Pores fermés.....	6
1.3.2 Pores ouverts.....	7
1.3.3 Réticulées.....	7
1.4 Grandeurs caractéristiques.....	7
1.4.1 Porosité.....	8
1.4.2 Surface spécifique.....	9
1.4.3 Morphologie et densité des pores.....	10
1.4.4 Grades des mousses métalliques.....	11
1.4.5 Perméabilité.....	11
1.4.6 Tortuosité.....	12
1.4.7 Conductivité thermique effective (CTE).....	13
1.5 Propriétés et avantages des mousses.....	14
1.6 Domaine d'application des mousses métalliques.....	15
1.7 Procédés de fabrication de mousses métalliques.....	21
1.7.1 Voie en phase vapeur.....	22
1.7.2 Voie métallurgie des poudres.....	23
1.7.3 Voie électrodéposition.....	24
1.7.4 Voie liquide.....	25
1.8 Travaux de recherche.....	26
1.8.1 Processus de réplique (infiltration).....	26
1.8.2 Tests de compression.....	27
1.8.2.1 Propriétés mécaniques: modèle de Gibson et d'Ashby.....	28
1.8.3 Propriétés thermiques.....	29
1.8.3.1 Corrélation empirique de la conductivité thermique effective (CTE).....	29
1.8.3.2 Transfert de chaleur par convection forcée à travers des mousses d'Al.....	32
1.8.3.3 Transfert de chaleur combiné dans les mousses d'aluminium.....	34
1.9 Conclusion sur la partie bibliographie.....	36

Références.....	37
Chapitre 2 : Fabrication et Analyse des Défauts de la Mousse d'Aluminium	
2-1 Introduction.....	43
2.2 Étapes du protocole général de répliation .....	43
2.2.1 Les équipements et matériaux nécessaires .....	43
2.2.2 Préparation préforme .....	44
2.2.3 Processus de Production des mousses .....	46
2.2.4 Les étapes du processus : .....	47
2.2.5 Les essais de production .....	48
2.2.6 Défauts dans la mousse d'aluminium produits .....	48
2-3 Théorie du processus d'infiltration .....	49
2.3.1 La Pression de seuil .....	49
2.3.2 Le gradient de pression .....	51
2.4 Causes de formation des défauts .....	54
2.5 Prévention du défaut.....	58
2.6 Mousse d'aluminium à cellules ouvertes produite.....	59
2.12 Conclusion .....	61
Références.....	63
Chapitre 3: Paramètres Structuraux et Propriétés Mécaniques de la Mousse d'Aluminium à Cellules Ouvertes	
3.1 Introduction.....	66
3.2 Paramètres structurels.....	66
3.2.1 Diamètre de pore .....	67
3.2.2 Densité .....	67
3.2.3 Porosité .....	67
3.2.4 La surface spécifique .....	67
3.2.5 Perméabilité.....	67
3.2.6 Tortuosité .....	67
3.3 Propriétés mécaniques de mousses en compression.....	69
3.3.1 Principe .....	69
3.3 Étude expérimentale des propriétés mécaniques.....	70
3.3.1 Propriétés mécaniques .....	71
3.3.2 Capacité d'absorption d'énergie par unité de volume .....	75

3.3.2.1 Efficacité d'absorption d'énergie.....	78
3.3.2 Capacité d'absorption d'énergie par unité de masse .....	80
3.4 Guide d'absorption d'énergie.....	81
3.4 Etude expérimentale de la localisation de la déformation .....	82
3.5 Conclusion .....	84
Références.....	85
Chapitre 4 : Performance Thermo-hydraulique de la Mousse d'Aluminium	
4.1 Introduction .....	88
4.2 Performance thermique de la mousse d'aluminium .....	88
4.2.1 Analyse numérique du transfert de chaleur unidimensionnelle .....	88
4.2.1.1 Théorie du transfert de chaleur unidimensionnelle .....	88
4.2.1.2 Equation sans dimension.....	91
4.2.1.3 Procédure numérique et conditions limites .....	92
4.2.2 Méthode expérimentale.....	94
4.2.2.1 Préparation des mousses d'aluminium.....	94
4.2.2.2 Appareils d'essai .....	94
4.2.2.3 Procédure de mesure .....	95
4.2.2.4 Analyse d'incertitude .....	96
4.2.2.5 Corrélation empirique .....	96
4.2.3 Caractéristique de transfert de chaleur d'échangeur en mousses d'aluminium .	97
4.2.4 Effet de la porosité sur le transfert de chaleur dans les mousses d'aluminium .	101
4.2.3 Conductivité thermique effective (CTE) .....	101
4.2.3.1 Détermination analytique .....	102
4.3 Etude expérimentale de chute de pression .....	105
4.3.1 Comparaison des résultats avec les travaux des autres chercheurs .....	106
4.4 Conclusion .....	107
Références.....	109
Conclusion Générale .....	111

## Liste des Figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Matériaux naturels	04
1.2	Les principales applications des mousses métalliques	05
1.3	Une vue 2D de la mousse avec une caméra numérique	06
1.4	Mousses métalliques à pores fermés	06
1.5	Mousses métalliques à pores ouverts	07
1.6	Mousses métalliques réticulées	07
1.7	Exemple d'une coupe transversale d'une mousse en polyuréthane	09
1.8	La géométrie des mousses métalliques	10
1.9	Images de mousses pour différents PPI	11
1.10	Schéma explicatif de la notion de tortuosité	13
1.11	Modèles de CTE en parallèle et en série	14
1.12	Applications des milieux cellulaires	15
1.13	Echangeur de chaleur	17
1.14	des filtres	17
1.15	Profilé métallique des crashes boxes	18
1.16	Comparaison des modes de flambement pour un profilé vide	18
1.17	Panneaux d'absorption acoustique en mousse d'aluminium	19
1.18	Photo de refroidissement thermique passif des lampes LED	20
1.19	Base d'un bras de levage en panneaux sandwich	20
1.20	Prototype d'un support de moteur BMW	21
1.21	Les diverses méthodes de production de matériaux métalliques cellulaires	21
1.22	Échantillon « Incofoam » fabriqué par procédé au nickel-carbonyle	22
1.23	Procédé de production de mousse par voie métallurgie des poudres	23
1.24	Panneau sandwich avec âme en mousse d'aluminium	24
1.25	Sandwich aluminium/mousse d'aluminium	24
1.26	Schéma de la méthode d'électrodéposition	24
1.27	Mousse de nickel préparée par électro-position	25
1.28	Schéma de la méthode d'infiltration	25
1.29	Caractéristiques de la structure de la mousse métallique	26
1.30	Schémas du système de production	27
1.31	Cellule modèle utilisée pour décrire une mousse à cellules ouvertes	28
1.32	Fléchissement de parois cellulaires pendant la déformation linéaire-élastique	28
1.33	Diagramme schématique d'une technique pour les mesures CTE	30
1.34	Montage expérimental de Sertkaya et al	33
1.35	Résultats de Sertkaya et al de Perte de pression par rapport à la vitesse	34
1.36	Distribution de la température dans la direction de l'écoulement	35

2.1	Plate-forme de fabrication de mousse	43
2.2	Moules de forme cylindrique et bloc rectangulaire	44
2.3	L'ordre des tamis utilisés pour séparer la taille des particules	45
2.4	Poudre de NaCl formée de particules de taille qui varie entre 1,5 - 2,0 mm	46
2.5	Étapes principales de production du mousse d'aluminium à cellule ouvert	46
2.6	Photos des échantillons composite aluminium/sel des mousses	48
2.7	Défauts dans les échantillons de mousse d'aluminium	48
2.8	Schéma du phénomène de non mouillage entre l'Al fondu - particules de sel	50
2.9	La Pression de seuil ( $P_{th}$ ) en fonction de la taille des particules	51
2.10	(a) Formation de colliers d'air en raison de l'infiltration de métal en fusion dans la couche de NaCl. (b) Modèle géométrique de la distribution de l'air entre deux particules	53
2.11	Le gradient de pression en fonction, la vitesse d'infiltration pour différentes tailles des particules et pour perméabilité relative égale	54
2.12	Principe de l'infiltration par un gaz à faible débit	55
2.13	(a) Echantillon obtenu après une infiltration partielle (b) Echantillon obtenu pour un gaz à faible débit (c) Echantillon obtenu à cause du piégeage de gaz	56
2.14	(a) Échantillon élaboré sous une pression de 6 bars (b) Échantillon élaboré sous une pression de 2 bars	57
2.15	Défaut de solidification de la mousse d'aluminium	57
2.16	Croquis de l'infiltration progressive entre les particules en contact	59
2.17	Surface latérale des échantillons avec une taille de pores de (1,5–2 mm) obtenue	60
2.18	Trois échantillons des mousses d'aluminium préparées par un moule cylindrique dont la taille des particules de NaCl est de : (a) 2-3 mm, (b) 1.5-2 mm et (c) 1-1,5 mm.	60
3.1	(a) Échantillons des mousses d'aluminium à cellules ouvertes avec différentes tailles de pores (b) Cellule de Kelvin (cellule unitaire de tétrakaïdécaèdre)	66
3.2	Essai de compression mécanique uniaxiale sur un échantillon cylindrique de longueur deux fois son diamètre	71
3.3	Courbe contrainte / déformation caractéristique des mousses d'aluminium obtenues avec différentes porosités.	73
3.4	Influence de la porosité $\phi$ sur le module d'élasticité E	74
3.5	Influence de la porosité $\phi$ sur la contrainte plateau $\sigma_p$	75
3.6	Energie de déformation de densification vs. Déformation	77
3.7	Energie de déformation de densification vs. Porosité	77
3.8	Energie de déformation de densification vs. Relative densité	78
3.9	Capacité d'absorption d'énergie vs. déformation	78
3.10	L'efficacité d'absorption d'énergie vs. déformation	79
3.11	L'efficacité d'absorption d'énergie vs. la contrainte	80
3.12	Courbes $W_m$ - $\sigma$ des mousses d'Al de différentes porosités	81

3.13	Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 20	82
3.14	Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 15	82
3.15	Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 10	82
4.1	(a) Echantillon de mousse. (b) Elément de volume de contrôle de la mousse.. (c) Groupe de points de quadrillage pour problème unidimensionnel	88
4.2	Vue de la section d'essai de la distribution de température unidimensionnelle et la chute de pression	94
4.3	Résultats numériques de $\theta_{fm}$ en fonction Z pour divers échantillons à vitesse d'écoulement 1m/s (cette fonction est tracée pour l'aluminium	98
4.4	Variation de $\theta_{fm}$ -Z basée sur une solution numérique à différentes valeurs de $S_p$ (où $\phi = 0,65$ )	98
4.5	Résultats expérimentaux de $\theta_f$ en fonction Z pour divers échantillons à la vitesse d'écoulement 1m/s.	99
4.6	Données expérimentales vs prédictions de corrélation empiriques (Eq. (4-22)).	99
4.7	Résultats expérimentaux de $\theta_f$ -Z pour 15 PPI à différentes vitesses	100
4.8	Conductivité thermique effective vs. porosité	103
4.9	la chute de pression par rapport la vitesse d'écoulement	104
4.10	La chute de pression maximale sous flux variante	106

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Porosité des matériaux poreux	9
1.2	Perméabilité des matériaux poreux	12
2.1	Principales propriétés physiques de l'aluminium	44
2.2	Propriétés de sel	45
3.1	Caractérisation des différents échantillons élaborés	68
3.2	Paramètres mécaniques des mousses d'aluminium avec différentes porosités $\varphi$	74
4.1	Emplacements des thermocouples	95
4.2	Valeurs de conductivité thermique effective des mousses d'aluminium	103

## Nomenclature

$d_f$	Diamètre de fibre	[mm]
$D_h$	Diamètre hydraulique	[mm]
$d_p$	Diamètre du pore	[mm]
$d_s$	Diamètre moyen des particules	[mm]
$E$	Module d'élasticité	[GPa]
$F$	Force	[N]
$f_h$	Facteur de frottement	
$h_{conv}$	coefficient de transfert de chaleur par convection	[W.m <sup>-2</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$h_0$	longueur initiale	[m]
$Q$	Fux thermique	[Watt]
$L$	Longueur du chemin réel	[m]
$L_e$	Longueur du chemin parcouru	[m]
$K$	perméabilité	[m <sup>2</sup> ]
$K_r$	Perméabilité relative	[m <sup>2</sup> ]
$K_s$	Perméabilité de préforme spécifique	[m <sup>2</sup> ]
$k_a$	Conductivité thermique d'air	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$k_f$	Conductivité thermique de fluide	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$k_{eff}$	Conductivité thermique effective (CTE)	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$k_s$	Conductivité thermique du solide	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$P$	Pression	[Bar]
$P_c$	Pression capillaire	[Bar]
$P_{th}$	Pression de seuil	[Bar]
$R$	Rayon	[m]
$PPI$	Pore par inch	
$\nabla P$	gradient de pression	[Pa. m. <sup>-1</sup> ]
$s$	Saturation	%
$S_p$	Surface spécifique	[m <sup>-1</sup> ]
$S_0$	Surface initiale	[m <sup>2</sup> ]
$T$	Température	[°C]
$V_p$	volume de vide (pore)	[m <sup>-3</sup> ]
$V_t$	volume total	[m <sup>-3</sup> ]

$W_m$	Energie absorbée par unité de masse	[MJ.m <sup>-3</sup> ]
$W_v$	Energie absorbée par unité de volume	[MJ.m <sup>-3</sup> ]
$W_{vd}$	Energie de déformation de densification	[MJ.kg <sup>-1</sup> ]
$x,y,z$	Coordonnées du système cartésien	[m]
<b>Lettres grecques</b>		
$\alpha$	Angle de contact à l'interface liquide/solide	[rd]
$\sigma$	Contrainte de déformation	[MPa]
$\varepsilon$	Déformation	%
$\rho$	Densité	[Kg.m <sup>-3</sup> ]
$\eta$	Efficacité d'absorption d'énergie	%
$\lambda$	Facteur géométrique	
$\varphi$	Porosité	%
$\theta$	Température sans dimension	
$\gamma$	Tension superficielle	[N m <sup>-1</sup> ]
$\tau$	Tortuosité	
$\mu$	viscosité dynamique du fluide	[Kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]

### Nombres adimensionnels

$R_{eh}$  Nombre de Reynolds

### Indices

$a$  air

$c$  base chauffée

$conv$  convection

$g$  globale

$fm$  mousse

$p$  plateau

$s$  solide

$t$  total

$e$  réel

## Introduction Générale

La tendance actuelle 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 côté la multifonctionnalité des matériaux combinant par exemple des bonnes caractéristiques mécaniques à des fonctionnalités comme les matériaux cellulaires, connus sous le nom de "métaux poreux ou mousses métalliques" en raison de leurs propriétés mécaniques et physiques, où on a observé un intérêt croissant pour les mousses métalliques légères pour l'automobile, échangeurs de chaleur, l'aérospatiale, réservoirs de pétrole, et d'autres applications. On note que les mousses métalliques sont des matériaux poreux, cellulaires et spongieux comme les éponges, les os, les coraux, etc. La structure des mousses métalliques est poreuse dans une fourchette de 40 % à 95 %. Jusqu'à présent, les mousses métalliques ont été produites sur la base d'aluminium, d'alliages d'aluminium (Al), de cuivre (Cu), de nickel (Ni), de magnésium (Mg),..., etc. [1,2].

Les mousses métalliques peuvent être classées en cellules ouvertes et cellules fermées selon le type de structure des pores [2]. Les structures à cellules ouvertes comportent des pores interconnectés, tandis que les pores à cellules fermées sont entourés d'une paroi métallique. Les mousses métalliques à cellules ouvertes sont une classe de matériaux relativement récente qui est devenue populaire dans de nombreux domaines de recherche. Ces matériaux se caractérisent par des propriétés intéressantes d'un point de vue structurel et thermique. En particulier, ces mousses métalliques possèdent une structure légère, un rapport surface/volume élevé et sont capables d'améliorer le mélange des flux et d'augmenter la turbulence. Ces caractéristiques les rendent adaptées à un large éventail d'applications de transfert de chaleur [3,4].

Parmi les mousses métalliques, on peut citer les mousses métalliques à base d'alliages d'aluminium et qui sont commercialement les plus appréciés en raison de leur faible poids spécifique, de leur grande ductilité, de leur conductivité thermique élevée et de leur coût compétitif [2]. L'élaboration et la caractérisation de ces mousses métalliques en alliage d'aluminium restent toujours un sujet de recherche, car il suffit de changer la taille des pores, leurs caractéristiques changent. C'est dans ce contexte, que nous avons mené ce travail de thèse de doctorat.

Cette étude est consacrée à l'élaboration de mousse métallique en aluminium ainsi qu'aux nombreuses applications potentielles qu'elles entraînent. Ce travail de thèse s'intéressera ensuite à deux propriétés en particulier : leurs propriétés métallurgiques

(macrostructures, mécaniques) et énergétiques (performances de transfert de chaleur). »

Le travail effectué est présenté en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre est une revue bibliographique, dans lequel nous présenterons les mousses métalliques et leurs caractéristiques principales, et le principe de fabrication des mousses. Actuellement, les différentes méthodes peuvent être classées en fonction de l'état dans lequel le métal est traité. Cela définit quatre « familles » [5] : chacune correspondant à l'un des états de la matière. La méthode de production pour cette étude est déterminée comme méthode de coulée sous vide ou d'infiltration, qui peut être classée comme la mousse à l'état liquide.
- Le deuxième chapitre comporte la méthode utilisée et les dispositifs expérimentaux utilisés pour fabriquer trois types de mousse métallique à cellule ouverte de 10,15 et 20 PPI (pores par inch), et l'analyse des défauts de leur fabrication pendant chaque étape de processus de l'infiltration (injection, infiltration et solidification) et nous proposons des solutions pour réduire ces défauts. Enfin, les techniques, méthodes pour mesurer la porosité et la densité et le modèle analytique utilisé pour déterminer la perméabilité du matériau poreux sont présentés avec les caractéristiques des échantillons.
- Le troisième chapitre présente les détails de l'étude expérimentale du comportement mécanique des échantillons des mousses d'aluminium. Après une description du banc d'essais et la procédure des essais, les résultats expérimentaux sont ensuite analysés.
- Dans le quatrième chapitre on a présenté l'expérience qui a été réalisée pour étudier les caractéristiques de transfert thermique de la mousse d'aluminium à différentes porosités. Nous présentons aussi des analyses numériques et expérimentales des échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes en utilisant un transfert de chaleur unidimensionnel. De plus, une étude comparative a été faite entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux.

Enfin, on complète notre travail par une conclusion générale, qui résume l'ensemble des résultats obtenus avec nos perspectives.

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur les Mousses Métalliques**

## 1.1 Introduction

Les mousses métalliques peuvent être définis comme un assemblage de cellules vides, enfermée chacune par des arêtes ou des parois solides pouvant contenir jusqu'à 95 % de vide [7]. On désigne communément par milieu poreux un solide de forme complexe renfermant des cavités appelées pores. Ces cavités peuvent communiquer entre elles et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler. La structure est faite de pores reliés ensemble sous forme d'une mousse ouverte ou isolée, donnant lieu à une mousse à cellule fermée, faite en cellule séparé qui emprisonne le gaz à l'intérieur [8].

On trouve dans la nature les matériaux cellulaires comme le bois, os, corail, le liège, et comme d'autres matériaux de construction biologique, qui montrent une configuration cellulaire de leur structure hiérarchique (Fig. 1.1).

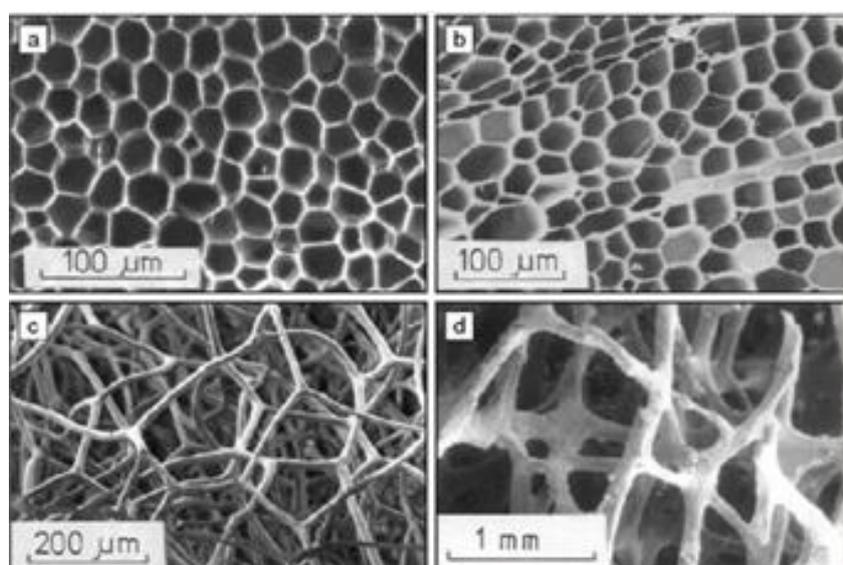


Figure 1.1 : Matériaux naturels : (a) liège, (b) bois balsa, (c) éponge, (d) os [9].

Plusieurs solutés peuvent être mousseux, comme les polymères et les verres, les céramiques et même des matériaux, comme le nickel et l'aluminium. Parmi les matériaux cellulaires, les mousses synthétiques et les mousses polymériques sont actuellement les plus importantes, car leurs applications ont une réponse dans plusieurs secteurs de la technologie [10]. Leurs combinaisons extraordinaires offrent des propriétés intéressantes comme leur haute rigidité, leur résistance aux feux, atténuation acoustique et leur réutilisation facile (Fig.1.2).

Les mousses métalliques constituent une nouvelle classe de matériaux très prometteuse. Les premières tentatives d'élaboration de mousse remontent aux années 1960. A cette époque, l'intérêt pour cette classe de matériaux n'a pas été suffisamment grand pour entreprendre une production à l'échelle industrielle. C'est durant les deux dernières décennies que le développement de mousses métalliques a connu ses plus grandes avancées en termes de qualité de produits et rentabilité des procédés de fabrication. En particulier, Al et leurs alliages sont largement utilisés comme matériaux ininflammables pour l'isolation thermique et acoustique, les noyaux sandwich, l'amortissement mécanique, les panneaux légers et la résistance aux chocs dans le transport, les isolateurs de contrainte et le contrôle des vibrations. [11].

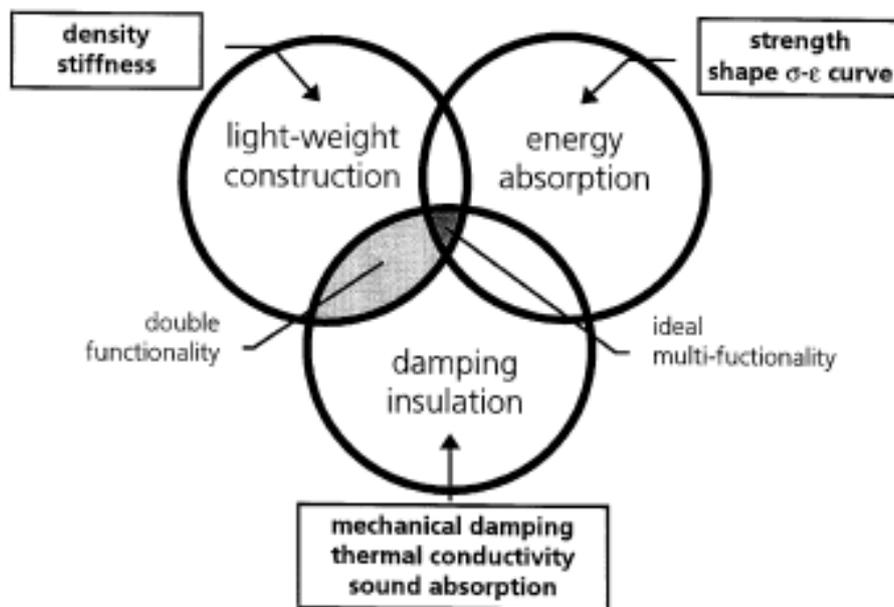


Figure 1.2 : les principales applications des mousses métalliques [4].

## 1.2 Description microstructurale

Ces matériaux possédaient dans la plupart des cas une morphologie qui pouvait être caractérisée à trois échelles distinctes, comme l'illustre la figure 1.3 L'échelle microscopique est relative à la microstructure du matériau constitutif du matériau cellulaire, l'échelle mésoscopique concerne la distribution des cellules, leur taille et leur forme et finalement l'échelle macroscopique décrit les grandeurs globales du matériau, comme sa densité, son anisotropie et son caractère cellulaire (ouvert ou fermé).

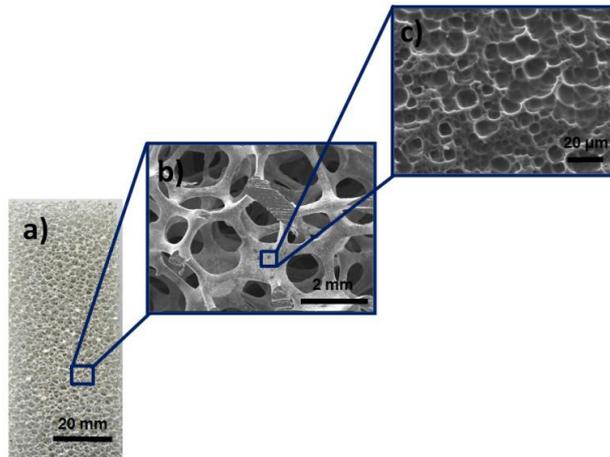


Figure 1.3 : (a) Une vue 2D de la mousse avec une caméra numérique à une résolution de 20 mm. (b) Le même image avec un grossissement plus élevé, qui a été obtenue à l'aide d'un appareil ESEM à une résolution de 2 mm. (c) La même image avec une résolution de 20  $\mu\text{m}$  [12].

### 1.3 Les différents types de mousse

Les mousses métalliques sont des matériaux macroscopiquement cellulaires, caractérisés par leurs structures topologiques (cellules ouvertes, cellules fermées), la densité relative, la taille et la forme des cellules et l'anisotropie. On distingue alors 3 types de mousses:

- Les mousses métalliques à pores fermés,
- Les mousses métalliques à pores ouverts,
- Les mousses métalliques réticulées

#### 1.3.1 Mousses métalliques à pores fermés

Les mousses à pores fermés se caractérisent par leurs cellules sphériques isolées par des parois souvent épaisses (Fig. 1.4)

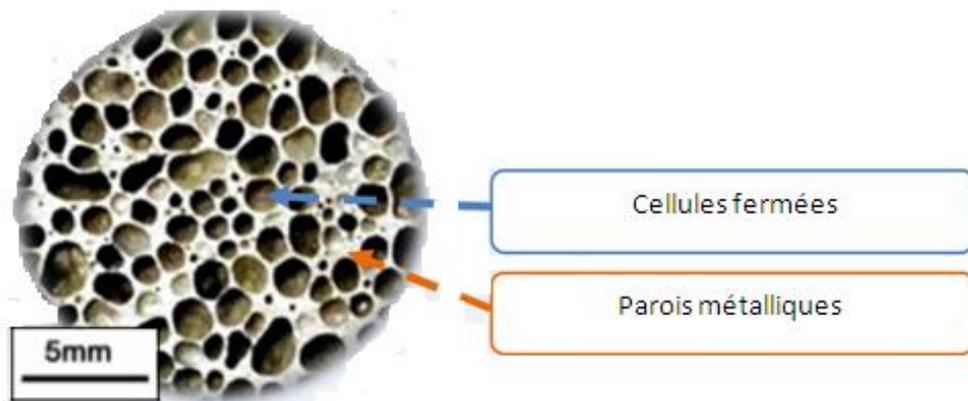


Figure 1.4 : Mousses métalliques à pores fermés [13].

### 1.3.2 Mousses métalliques à pores ouverts

Les mousses à pores ouverts présentent des cellules connectées. La structure géométrique d'une mousse ouverte est généralement plus complexe que celle des mousses à cellules fermées (Fig. 1.5).

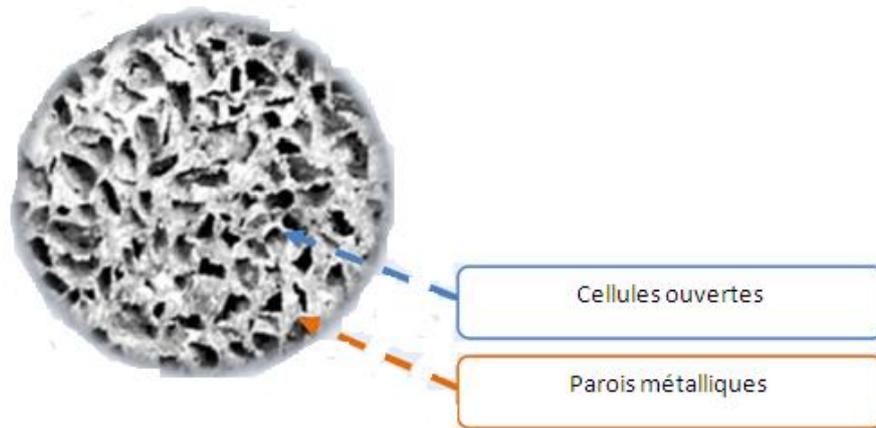


Figure 1.5 : Mousses métalliques à pores ouverts [13].

### 1.3.3 Mousses métalliques à pores réticulées

Les mousses métalliques réticulées sont similaires aux mousses métalliques à pores ouverts, cependant elles ne présentent pas de pores, mais des réticulations. Pour les plus fines d'entre ces mousses, il est même possible de voir au travers. Ces mousses métalliques sont donc les plus poreuses de ces matériaux cellulaires (Fig. 1.6).

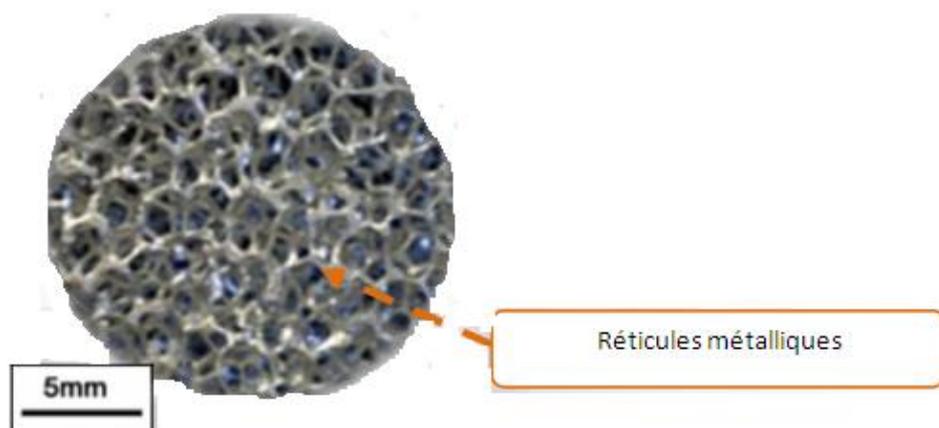


Figure 1.6 : Mousses métalliques réticulées [13].

## 1.4 Grandeurs caractéristiques

Les milieux poreux ou les mousses métalliques sont caractérisés par un certain nombre de grandeurs moyennes, géométriques ou statiques. On distingue :

### 1.4.1 Porosité

La porosité  $\varphi$  d'un milieu poreux est définie comme la fraction du volume total du milieu qui est occupée par l'espace vide (Fig. 1.7). Ainsi,  $1 - \varphi$  est la fraction occupée par le solide. Pour un milieu isotrope, la « porosité de surface » (c'est-à-dire la fraction de la surface vide à la surface totale d'une section typique) sera normalement égal à  $\varphi$ . En définissant  $\varphi$  de cette manière, nous supposons que tout l'espace vide est connecté. Si, en fait, on a affaire à un milieu dans lequel une partie de l'espace poreux est déconnectée du reste, alors il faut introduire une « porosité effective », définie comme le rapport du vide connecté au volume total. Pour les milieux naturels,  $\varphi$  ne dépasse normalement pas 0,6. Pour les lits de sphères solides de diamètre uniforme  $\varphi$  peut varier entre les limites 0,2595 (garniture rhomboédrique) et 0,4764 (garniture cubique). La non-uniformité de la taille des grains a tendance à conduire à des porosités plus petites que pour les grains uniformes, car des grains plus petits remplissent les pores formés par des grains plus gros. Pour les matériaux artificiels tels que les mousses métalliques,  $\varphi$  peut approcher la valeur 1 [14]. Le tableau 1.1 montre la variation de la porosité pour différents matériaux [14].

On a alors [15, 16] :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_t}. \quad (1-1)$$

D'autre méthode qui se base sur les mesures de la densité : cette méthode se fonde sur une relation simple [17] :

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}. \quad (1-2)$$

Avec  $\rho_g$  densité globale des milieux poreux,  $\rho_m$  densité du matériau qui forme la structure solide du milieu poreux. Pour déterminer le coefficient  $\rho_g$  il existe différentes techniques, par exemple les mesures des paramètres géométriques et la pesée de l'échantillon, ou encore la substitution volumétrique (cette technique prévoit l'immersion de l'échantillon dans un liquide non mouillant, par exemple le mercure, qui ne pénètre pas dans le milieu poreux), etc.

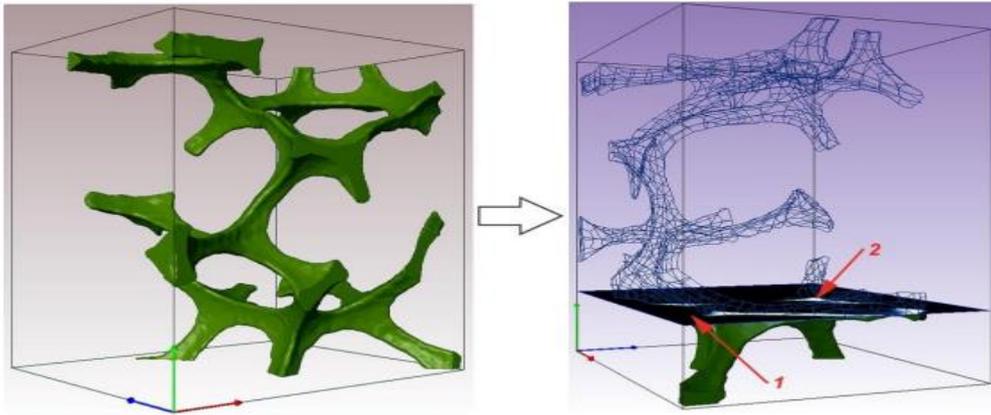


Figure 1.7 : Exemple d'une coupe transversale d'une mousse en polyuréthane :  
 1 - surface occupée par des pores (noir), 2 – phase solide (blanc) [14]

Matériaux	Porosité $\varphi$ .
Poudre d'ardoise noir	0,57 – 0,66
Brique	0,12 – 0,34
Béton (bitumineux)	0,1
Poudre de cuivre (compacté à chaud)	0,09 – 0,34
Verre fibreux	0,88 – 0,93
Roche granulaire concassé	0,45
Cheveux (mammifères)	0,95 – 0,99
Cuir	0,56 – 0,59
Calcaire (dolomite)	0,04 – 0,10
Sable	0,37 – 0,50
Grès	0,08 – 0,38
Grains de silice	0,65
Poudre de silice	0,37 – 0,49
Sol	0,43 – 0,54

Tableau 1.1 : Porosité des matériaux poreux [14].

#### 1.4.2 Surface spécifique

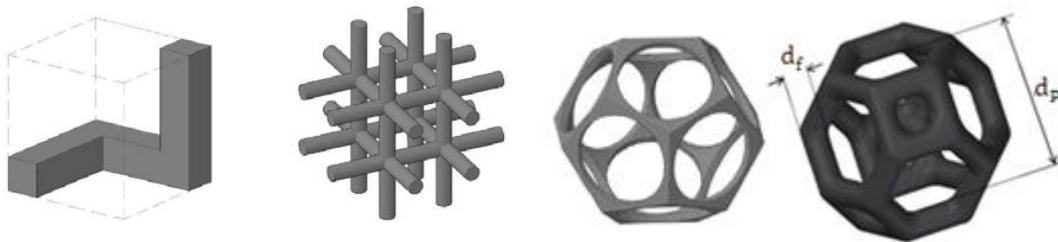
Les surfaces spécifiques des milieux poreux ressemblant à la mousse et elles sont d'intérêt particulier pour les performances et la conception des réacteurs et des échangeurs de chaleur qui, en raison de leurs valeurs élevées, améliorer le transfert de chaleur et de masse [18]. La définition la plus largement utilisée pour la surface spécifique de la mousse structures est la surface totale des interfaces solides pores par volume brut de mousse sous réserve de l'hypothèse que les surfaces des interfaces sont parfaitement lisses [19], elle s'exprime comme suit [14, 20]:

$$S_p = \frac{6(1-\varphi)}{d_p} \quad (1-3)$$

Avec  $d_p$  : diamètre de pore

### 1.4.3 Morphologie et densité des pores

On note quatre modèles de géométrie de pores bien reconnus existent dans la littérature pour approximer la géométrie des mousses métalliques, à savoir : (i) le modèle à cellule unitaire représentative (RUC), (ii) le modèle de cellule unitaire cubique, (iii) le modèle de dodécaèdre pentagonal et (iv) le modèle du tétraèdre. Des représentations schématiques des modèles sont présentées aux figures 1.8 (a) à (d), respectivement [21]. Les volumes ombrés représentent les supports solides de la structure en mousse. Le modèle de cellule cubique se compose d'une cellule cubique avec des supports cylindriques sur les bords. Le modèle dodécaèdre se compose de 12 faces pentagonales avec des supports triangulaires (dans le cas de la porosité élevée) et des supports cercles (dans le cas de la porosité inférieure). Le modèle tétrakaïdèdre se compose de 14 faces dont six sont des carrés et les huit hexagones restants.



**Figure 1.8 :** (a) RUC model; (b) Cubic unit cell; (c) Dodécaèdre; (d) Tétrakaïdèdre [21].

Le diamètre des pores  $d_p$  a été estimé en comptant le nombre de pores dans une longueur donnée de mousse métallique. Il peut être calculé à l'aide des équations suivantes [22] :

$$d_p = \frac{0.0254m}{PPI} \quad (1.4)$$

Où:

PPI: Nombre de pores par pouce

Cependant, la technique de numérotation est très élémentaire et peu précise, mais elle constitue l'une des méthodes de normalisation parmi les fabricants et les chercheurs [23].

Le diamètre de la fibre  $d_f$  peut être calculé par l'équation suivante [24]:

$$d_f = d_p \frac{1.18 \sqrt{\frac{(1-\varphi)}{3\pi}}}{1 - \exp\left(\frac{\varphi-1}{0.04}\right)} \quad (1.5)$$

#### 1.4.4 Grades des mousses métalliques

On doit mentionner que le nombre moyen de pores par pouce (valeur PPI) est l'un des caractéristiques géométriques les plus importantes des matériaux cellulaires tels que les mousses ouvertes ou fermées. Il est défini comme le nombre de pores (cellules) le long d'une ligne de test droite liée à la longueur de la ligne. Compter les cellules le long d'une ligne de test semble très simple, mais à la surface d'un échantillon de mousse ouvert, il est souvent difficile de décider si une cellule atteint la ligne ou non [23]. La figure 1.9 présente quelques exemples des mousses pour différents PPI.



Figure 1.9 : Images de mousses pour différents PPI [25].

#### 1.4.5 Perméabilité

Le concept de perméabilité ( $K[m^2]$ ) a été proposé pour la première fois par Henry Darcy en 1856 sur la base de tests en laboratoire sur le débit volumétrique et la différence de pression à travers un lit de sable. De plus, la connaissance de la perméabilité est essentielle pour une conception et une exploitation réussies de

systèmes industriels à hautes performances. Dans la plupart des littératures, La loi de Darcy s'écrit sous la forme :

$$K = -\frac{\mu}{\nabla P}u \quad (1.6)$$

Où :  $\mu$  [Pa.s] la viscosité,  $u$  [m.s<sup>-1</sup>] est la vitesse; et  $\nabla P$  [Pa.m<sup>-1</sup>] le gradient de pression.

A titre d'exemple, la perméabilité pour différents matériaux est donnée dans le Tableau 1.2.

Matériaux	Perméabilité $K$ (cm <sup>2</sup> )
Poudre d'ardoise noir	$4,9 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$
Brique	$4,8 \cdot 10^{-11} - 2,2 \cdot 10^{-9}$
Béton (bitumineux)	$1 \cdot 10^{-9} - 2,3 \cdot 10^{-7}$
Poudre de cuivre (compacté à chaud)	$3,3 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5}$
Cuir	$9,5 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$
Calcaire (dolomite)	$2 \cdot 10^{-11} - 4,5 \cdot 10^{-10}$
Sable	$2 \cdot 10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-6}$
Grès	$5 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-8}$
Poudre de silice	$1,3 \cdot 10^{-10} - 5,1 \cdot 10^{-10}$
Sol	$2,9 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-7}$

Tableau 1-2 : Perméabilité des matériaux poreux [14].

#### 1.4.6 Tortuosité

La tortuosité est une propriété intrinsèque du cadre solide relative à l'espace poreux et à la géométrie [26] et est un paramètre important pour prédire les vitesses de phase d'un matériau poreux. La tortuosité est le rapport de longueur de chemin réel par la longueur de chemin direct [27], comme il est illustré dans la figure (1.10). Elle est définie par l'expression suivante:

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (1.7)$$

Avec :  $L_e$  [m] longueur du chemin réel et  $L$  [m] longueur du chemin direct.

Inayat et al. [28] ont proposé ce qui suit pour calculer la tortuosité :

$$\tau = 1 + 1.21751 - \frac{1-0.971(1-\varphi)^{0.5}}{(1-\varphi)^{0.5}} \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \quad (1.8)$$

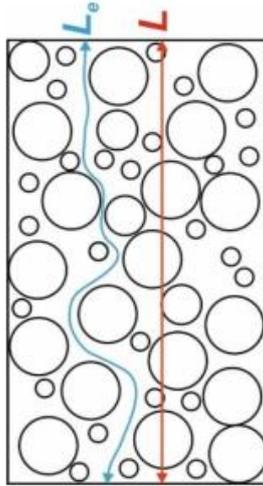


Figure 1.10 : Schéma explicatif de la notion de tortuosité [27].

#### I.4.7 Conductivité thermique effective (CTE)

La conductivité thermique est un facteur essentiel dans la conception de matériaux à pores ouverts appliqués dans les dispositifs de transfert de chaleur tels que les échangeurs de chaleur à flux croisés, les convertisseurs catalytiques, les électrodes de piles à combustible à haute température ou les capteurs solaires [5]. Deux modèles analytiques simples sont utilisés pour la détermination de la conductivité thermique effective, Wiener [29] a développé un modèle simple en considérant les deux phases comme étant soit en parallèle, soit en série l'une avec l'autre : (Fig.1.11).

- **Modèle en série :**

Dans ce modèle, le flux de chaleur traverse successivement la phase fluide et la phase solide. Donc, la conductivité thermique effective est la somme des conductivités thermiques dans chacune des deux phases. Elle est donnée comme suit :

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{(1-\varphi)}{k_s} + \frac{\varphi}{k_f} \quad (1.9)$$

Avec :  $k_s$  [W/m.°C] le coefficient de conductivité de la partie solide et  $k_f$  [W/m.°C] le coefficient de conductivité de la partie fluide.

- **Modèle en parallèle :**

Dans ce modèle, le flux de chaleur traverse les deux phases fluide et solide en même temps, alors la conductivité thermique effective est la moyenne des deux conductivités. Elle est donnée sous la forme :

$$k_{eff} = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_f \quad (1.10)$$

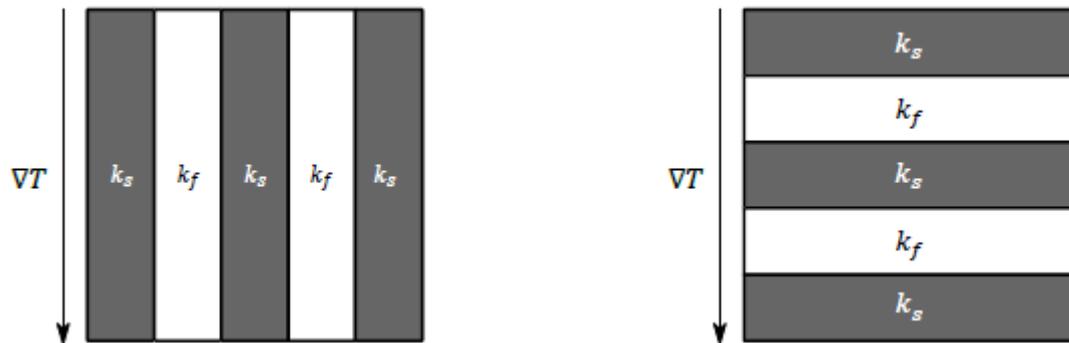


Figure 1.11 : Modèles de CTE en parallèle (gauche) et en série (droite) [29].

### 1.5 Propriétés et avantages des mousses

Les mousses métalliques captivent les scientifiques partout dans le monde depuis des décennies à cause de leur combinaison incomparable d'attributs, elles sont une classe de matériaux qui offrent aux fabricants le potentiel significatif pour les structures légères, pour l'absorption d'énergie et la gestion thermique, ils sont en effet caractérisés par les avantages suivants [1, 30] :

- Les mousses métalliques ont une faible densité avec une bonne résistance à la rupture ;
- Les mousses métalliques ont une capacité exceptionnelle à absorber l'énergie à une pression presque constante ;
- Une légèreté, ces mousses présentent également une forte porosité (>95%) qui limite les pertes de charges;
- Une surface spécifique très élevée et donc par leur aptitude à évacuer une grande quantité de chaleur;
- Un des chemins d'écoulement non linéiques permettant un très bon mélange;
- Une excellente propriété acoustique (facteur de perte dans la gamme des fréquences auditive), donc une atténuation du son;
- Une grande gamme de variétés de mousse en termes de porosité et de matériaux (cuivre, nickel, chrome, aluminium...) pour diverses applications (de  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $400^{\circ}\text{C}$ ) ;
- Un matériau recyclable ;
- Une forme innovatrice ;

- Les mousses à cellules ouvertes avec une taille de pores contrôlée ont la capacité de filtrer les gaz et les liquides à haute température

### 1.6 Domaine d'application des mousses métalliques

Les mousses à cellules ouvertes possèdent des milliers de bulles éclatées, ce qui permet aux gaz et aux liquides de passer au travers. Cette caractéristique les rend idéales pour plusieurs applications. Les mousses à cellules fermées, à la différence de celles à cellules ouvertes, sont composées de milliers de bulles non éclatées. Ainsi, les gaz et les liquides ne peuvent passer à travers ce matériau. Leur étanchéité et leur légèreté est telle que certaines de ces mousses peuvent flotter sur l'eau. Elles sont très prometteuses pour des applications envisagées notons les châssis, d'automobile, les composantes de fuselage d'avion, les wagons de train, mais aussi des panneaux de revêtement pour les façades de bâtiment. [13]. La figure 1.12 montre un diagramme des applications des matériaux cellulaires en fonction de leur morphologie.

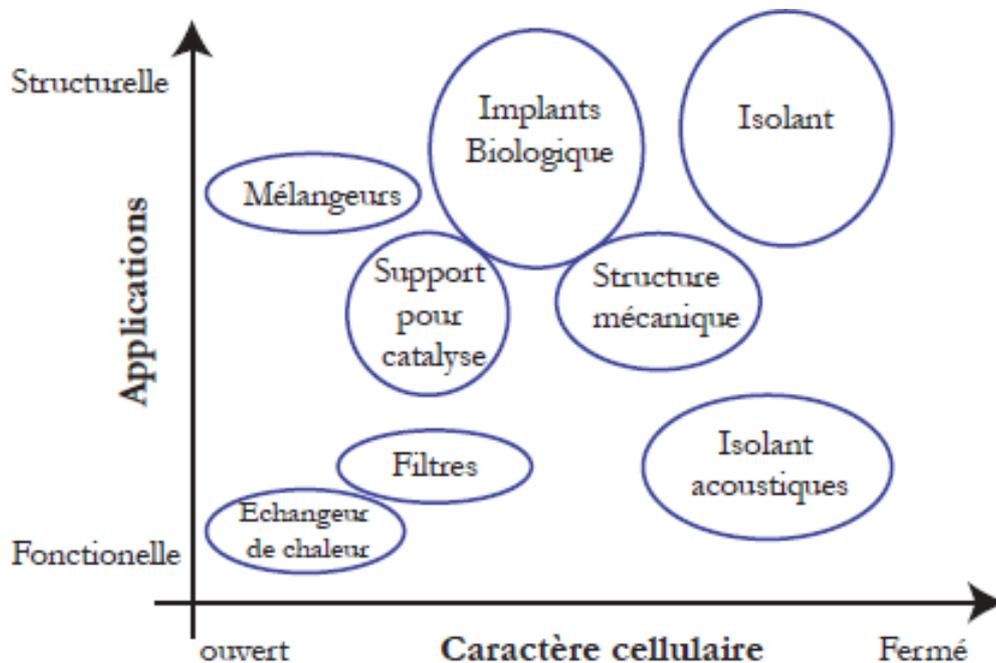


Figure 1.12 : Applications des milieux cellulaires [5].

Pour ces raisons, elles sont utilisées dans de nombreuses applications dans divers secteurs industriels telles que [5] :

- Industrie automobile ;
- Industrie aérospatiale ;
- La construction navale ;
- Industrie ferroviaire ;
- Industrie du bâtiment ;
- Construction de machines ;
- Équipement sportif ;
- Industrie biomédicale.

On trouve sur le marché une large palette d'applications fonctionnelles à base de mousses métalliques [5, 31].

- Stockage et transfert de liquide
- Les structures porteuses de catalyseur ;
- Le système antibué ;
- L'électrode pour batteries ;
- Les électrodes pour citerne de carburant ;
- L'évaporateur ;
- Les filtres. voir la figure 1.13;
- L'intercepteur de flamme ;
- Les Redresseurs et diviseurs d'écoulement et débit (pour canalisations de gaz, liquides, intérêt spécifique au processus de refroidissement de fibres);
- L'échangeur de chaleur et machines de refroidissement (voir la figure 1.14;
- Les silencieux pour vannes de contrôle (détendeurs de pression), sous forme de garnitures ou d'inserts ;
- Les brûleurs à gaz pré-mélangé ;
- Les atomiseurs rotatifs pour atomisation ultra fine ;
- Arrête-flammes et le pare-étincelles (moteurs diesel) ;
- Les silencieux et contrôle acoustique (d'échappement, de type restrictif, atténuateurs);

- Les absorbeurs et déflecteurs d’ultrasons, et beaucoup d’autres.



**Figure 1.13 : Echangeur de chaleur**



**Figure 1.14 : Des filtres [31]**

Les applications des mousses métalliques sont fortement liées aux propriétés que ces types de matériaux peuvent offrir et surtout à celles qui sont excellentes, voire uniques. Certaines des propriétés sont évidemment principalement liées à celles du métal de la matrice lui-même, par exemple les mousses d'Al et de Cu peuvent très bien conduire la température à travers la matrice, et par conséquent, ces mousses sont utilisées pour les échangeurs de chaleur. Aussi, les mousses de nickel sont utilisées comme électrodes dans les batteries nickel-métal hydrure (NiMh) et permettent de réaliser des gains d'énergie considérable par rapport aux batteries nickel / cadmium (NiCd) classique. Ces systèmes de batteries au nickel (NiMh) sont désormais utilisés par les leaders mondiaux constructeurs automobiles (GM, Toyota, Honda, PSA) pour la prochaine génération de véhicules électriques et des véhicules hybrides [13].

#### **Le cas du crash box**

Les mousses d'aluminium intéressent particulièrement l'industrie automobile en matière de protection. En effet, les mousses d'aluminium remplacent maintenant, dans de nouveaux véhicules, le profilé métallique des crashs boxes

(Fig. 1.15) placé à l'avant du véhicule. La mousse va pouvoir absorber l'énergie cinétique en cas de collision du véhicule bien plus efficacement qu'un profilé métallique standard [13].



Figure 1.15 : Profilé métallique des crashes boxes [13].

### Solutions techniques pour le remplissage de corps creux

D'après la figure 1.16, on peut comparer un crash box avec un profilé métallique standard (à gauche) et d'un crash box avec une mousse métallique en aluminium (à droite). Le profilé de gauche a été comprimé violemment: on distingue 3 plis principaux. À droite, le même profilé rempli de mousse : les plis d'écrasement sont plus nombreux, ce qui garantit une dissipation d'énergie supérieure.

De plus l'utilisation de mousses métalliques d'aluminium dans les crashes boxes d'un véhicule possède un autre atout majeur : leurs masses réduites (par rapport au profilé standard. Les mousses grâce à leur comportement anisotropique assurent leur fonction quelque soit la direction du choc, contrairement à la plupart des crash-box actuels qui sont davantage conçus pour un choc frontal.

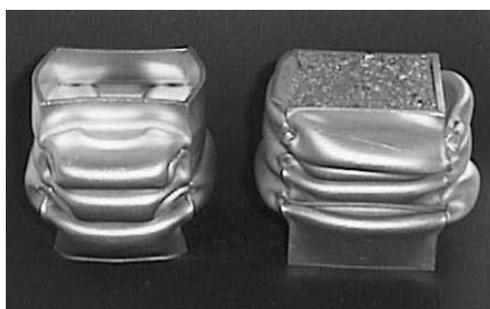
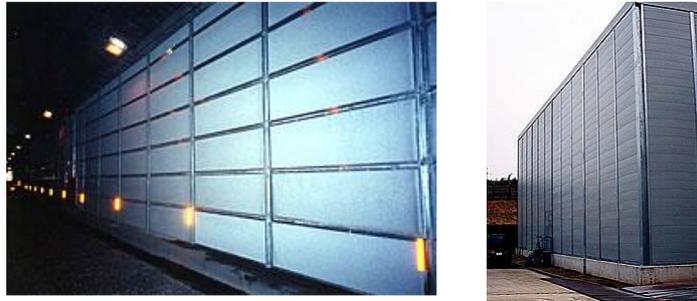


Figure 1.16 : Comparaison des modes de flambement pour un profilé vide (à gauche) de section carrée de 50 mm de côté et pour ce même profilé rempli de mousse d'aluminium (à droite). La mousse d'aluminium change la longueur d'onde des plis et permet au profilé de dissiper intrinsèquement plus d'énergie. Il y a interaction entre la mousse et le profilé [32].

## Absorption acoustiques

Les propriétés acoustiques de mousses métalliques le moyen qu'elles trouvent des utilisations dans beaucoup d'endroits où l'absorption saine est essentielle, comme par exemple le long des côtes d'une route pour réduire le trafic ébruité (Fig. 1.15).

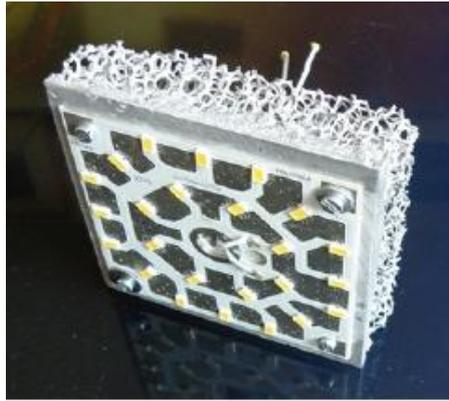


**Figure 1.17 : Panneaux d'absorption acoustique en mousse d'aluminium Alporas à côté des routes (à gauche) ou comme isolation de bâtiments (à droite) au Japon [33]**

## L'application spéciale des échangeurs de chaleur

Les mousses à cellule ouverte ont la grande superficie accessible, et la conduction élevée des murs des mousses donnant la capacité exceptionnelle de transfert thermique. Ils trouvent également des applications architecturales purement sur la base de leur qualité esthétique, leur poids léger est un avantage supplémentaire. Elles sont aussi d'excellents matériaux pour arrêter les flammes dans des environnements, tels que le long des pipes et servent à aérer des clôtures. Ces mousses sont ignifuges et fortement perméables, ainsi peuvent également être employés dans des applications de protection du souffle.

Quelques mousses représentent des structures cellulaires extrêmement poreuses. De ce fait, leurs propriétés présentent un intérêt majeur pour des applications industrielles telles que les échangeurs de chaleur. Une application spéciale des échangeurs de chaleur est le refroidissement thermique passif, un champ où la demande des puits de chaleur très efficaces augmente en raison de la croissance rapide des performances des ordinateurs et les appareils électroniques mobiles. De nos jours, les lampes standard sont remplacées par des lampes LED puissantes (Fig. 1.18). Cette puissance doit être refroidie pour assurer l'efficacité des LED et protéger les composantes électroniques. Ici, où un ventilateur « bruyant » ne peut pas être installé, mousser les dispositifs de refroidissement passifs avoir une opportunité [31]. Ces applications peuvent combiner leur fonctionnalité avec un design innovant.



**Figure 1.18 : Photo de refroidissement thermique passif des lampes LED [31].**

### **Technologie sandwich mousse d'aluminium**

L'intérêt de la mousse métallique devient évident lorsque des tensions de pliage sont considérées en fonction du poids, la distribution de la masse des structures cellulaires augmente le moment global de l'inertie du matériel, et donnant une rigidité à la flexion et une résistance spécifique bien plus haute que pour le poids correspondant du métal en bloc. (ALM) une société dérivée des activités de mousse métallique de Karmann's a construit un nouveau bras de levage supportant une plate-forme de réparation montée sur un petit camion (voir Figure 1.19).



**Figure 1.19 : Base d'un bras de levage en panneaux sandwich. Le fabricant est Matériaux légers avancés GmbH à Saarbrücken, Allemagne [34].**

Le constructeur automobile allemand BMW a conçu un support de moteur dans lequel composé une surface extérieure moulée et d'un noyau intérieur léger. Ces composés ont des caractéristiques de service bénéfiques telles qu'une rigidité plus élevée et un amortissement amélioré par rapport à une ébauche à noyau creux tout en ayant un poids légèrement plus élevé (Fig. 1.20).



Figure 1.20 : Prototype d'un support de moteur BMW fabriqué par LKR Ranshofen (Autriche). De gauche à droite : moulage vide, pièce composée d'un noyau en mousse et coupe à travers la pièce composite [34].

### 1.7 Procédés de fabrication de mousses métalliques

Il existe de nombreux moyens de fabriquer des matériaux métalliques cellulaires. Certaines méthodes sont similaires aux techniques utilisées pour mousser les liquides aqueux ou polymères, tandis que d'autres sont spécialement conçues pour tirer parti des propriétés caractéristiques des métaux.

Les différentes méthodes peuvent être classées en fonction de l'état dans lequel le métal est traité. Cela définit quatre familles de processus résumées dans la figure 1.21, et chacune correspondant à l'un des états de la matière [5] :

- 1- à partir de métal en liquide.
- 2- du métal solide sous forme de poudre.
- 3- à partir de métal vaporisé ou de composés métalliques gazeux.
- 4- à partir d'une solution de métal ionisé.

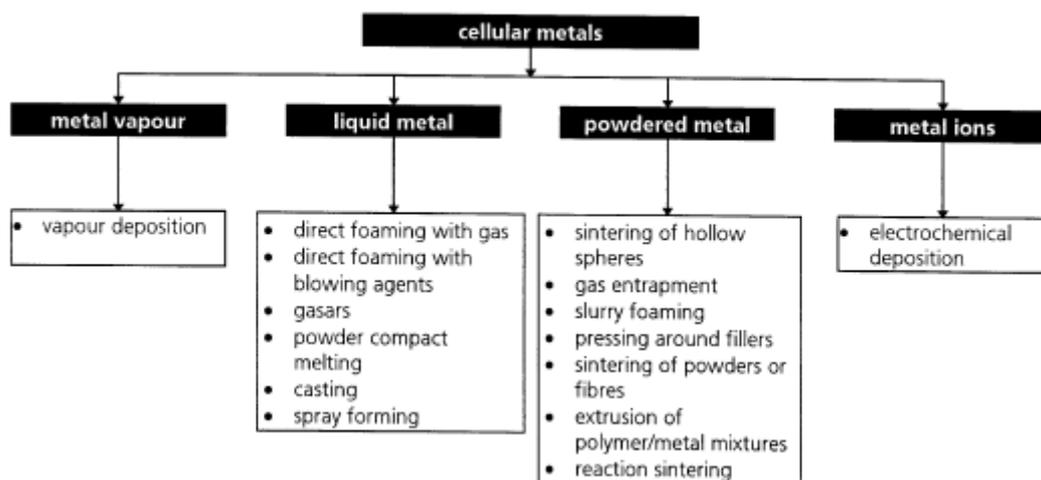


Figure 1.21 : Les diverses méthodes de production de matériaux métalliques cellulaires [5].

La fabrication d'une mousse exige l'utilisation au moins deux constituants chimiques : un gaz et une poudre, ou un sel et une poudre, où le premier constituant sert à former les bulles donc le vide, et le second sert à former les murs ce qu'on appelle les arrêtes des cellules.

### 1.7.1 Voie en phase vapeur

Les mousses métalliques peuvent également être fabriquées à partir de métal gazeux. Peut produire la vapeur métallique dans une chambre à vide et la vapeur peut se condenser sur le précurseur froid. Le métal condensé recouvre la surface du précurseur polymère et forme une pellicule d'une certaine épaisseur caractérisée par la densité de la vapeur et le temps d'exposition. Une façon d'effectuer ce processus par dépôt de vapeur [5]. Par exemple, pour la fabrication de mousses de nickel, on peut utiliser la voie du carbonyle de nickel très efficace pour enrober le précurseur de nickel à des températures très basses. Le nickel carbonyle est produit par réaction  $\text{Ni} + 4\text{CO} \rightarrow \text{Ni}(\text{CO})_4$  [35]. Le nickel carbonyle est un gaz qui se décompose en nickel et en carbone monoxyde lorsqu'il est chauffé à des températures supérieures à 120 °C. On peut donc recouvrir le précurseur du polymère en laissant passer un flux de nickel carbonyle à de telles températures. Le nickel formé lors de la décomposition s'accumule sur le précurseur, créant ainsi un revêtement métallique. Le polymère peut simplement être conservé à la température de décomposition requise du carbonyle par chauffage infrarouge [36,37]. Après refroidissement, le polymère peut être retiré par traitement thermique ou chimique et le même type de matériau avec des entretoises creuses est obtenu comme dans le galvanique.

Les mousses de nickel fabriquées dans cette voie sont disponibles commercialement sous le nom « Incofoam » [38] en feuilles minces d'une épaisseur maximale de 3,3 mm. Les densités varient de 0,2 à 0,6 g/cm<sup>3</sup>, la pureté des matériaux (99,97 % Ni) et les forces de traction sont d'environ 0,6 MPa pour une densité moyenne. L'aspect de « Incofoam » illustré dans la figure 1.22.

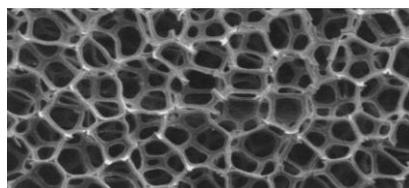
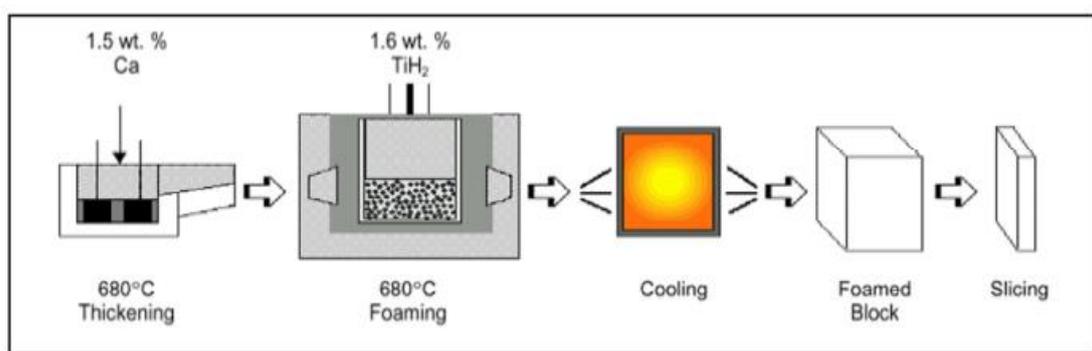


Figure 1.22 : Échantillon « Incofoam » fabriqué par procédé au nickel-carbonyle (20 ppi) [38].

### 1.7.2 Voie métallurgie des poudres

D'après la figure 1.23, le principe consiste à mélanger tout d'abord un agent moussant (en général du  $TiH_2$ ) avec de l'aluminium sous forme pulvérulente, puis de consolider l'ensemble en produit semi-fini en lui faisant subir une compaction. Ce produit semi-fini peut être mis en forme en le faisant passer à travers les procédés classiques de mise en forme à froid. Le processus de moussage s'active en chauffant l'ensemble au-dessus du solide de l'aluminium, par décomposition de l'agent moussant à haute température et dégagement gazeux. Cette réaction produit une mousse liée au moule qui est en général constitué d'une feuille d'aluminium. Le principal avantage de ce procédé est de pouvoir produire des produits quasi finis avec une liberté de forme assez large et surtout une bonne adhérence de la mousse à son enveloppe. Le composite ainsi formé possède de très bonnes propriétés spécifiques. Toutefois, la forme de la pièce doit être particulièrement étudiée afin d'homogénéiser le refroidissement, en effet, une vitesse de solidification plus lente dans une partie de la pièce conduit à une porosité plus importante. C'est le paradoxe de ce procédé, car en conception, une partie massive correspond, en général, à une partie plus fortement sollicitée de la pièce [32]. Ce procédé conduit donc à produire des pièces fragilisées aux endroits les plus sollicités. Selon la réf. [39], le matériau poreux avec une porosité aussi élevée que 95% pourrait être réalisé par cette méthode.



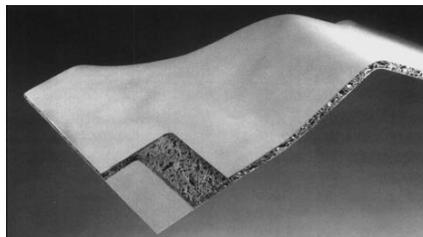
**Figure 1.23 : Procédé de production de mousse d'aluminium par voie métallurgie des poudres [40]**

La figure 1.24 montre la structure de la mousse métallique préparée selon la méthode de la métallurgie des poudres. La mousse d'aluminium peut être combinée avec des plaques frontales en acier [41] ou en titane en plus des plaques frontales en aluminium (Fig. 1.24). Un grand sandwich aluminium/mousse d'aluminium a été développé dans le cadre d'un effort conjoint du constructeur automobile allemand

Karmann et du Fraunhofer-Institut. Une de ces pièces est illustrée à la figure 1.25. Ces sandwichs sont en forme de 3D, jusqu'à 2 m de long et environ 1 m de large [5]



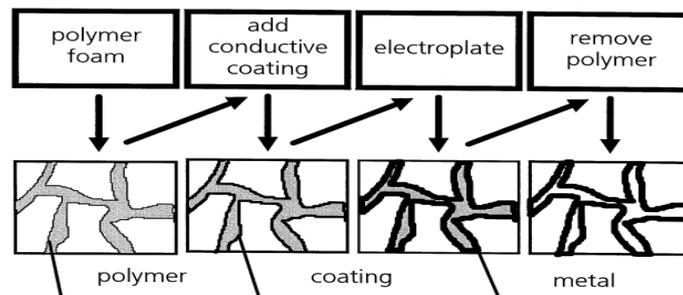
**Figure 1.24 : Panneau sandwich avec âme en mousse d'aluminium (épaisseur 12 mm) et deux tôles d'acier**



**Figure 1.25 : Sandwich aluminium/mousse d'aluminium (épaisseur 10 mm) [5].**

### 1.7.3 Voie électrodéposition

Afin de remplacer la mousse de polymère par du métal, la méthode d'électrodéposition est développée au cours des deux dernières décennies, et le schéma est illustré à la figure 1.25. Cette méthode doit être effectuée dans l'électrolyte avec des ions métalliques. Avec l'aide du courant électrique, les ions métalliques pourraient être déposés sur la mousse de polymère avec le revêtement conducteur. Enfin, le polymère contenu dans la mousse métallique est éliminé par le chauffage d'échantillon [42]. La méthode d'électrodéposition pourrait produire des mousses de nickel et de cuivre avec une bonne connectivité des pores et une structure uniforme.



**Figure 1.26 : Schéma de la méthode d'électrodéposition [4]**

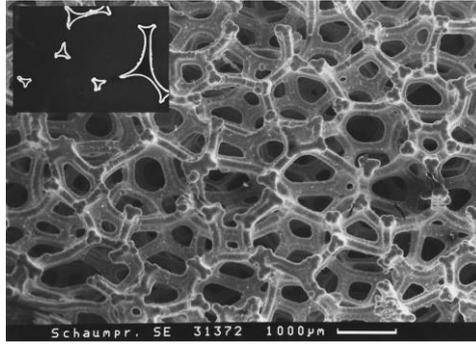


Figure 1.27 : Mousse de nickel préparée par électro-position [4]

### 1.7.4 Voie liquide

La méthode d'infiltration est une méthode de préparation traditionnelle pour la mousse métallique à cellules ouvertes, qui pourrait préparer la mousse d'Al, de Mg et de Zn. Cette méthode présente de nombreux avantages, comme un processus simple, un faible coût et un bon contrôle de la taille et de la porosité [43]. La particule de sel est toujours appliquée comme préforme pour faire la structure de cellule ouverte [44]. Le diagramme schématique du processus d'infiltration est présenté dans la figure 1.28. Les principaux processus sont l'injection, l'infiltration et la solidification. Tout d'abord, le moule rempli de sels doit être préchauffé pour maintenir la viscosité du métal fondu pendant le processus d'infiltration. Comme le métal fondu et le sel ne mouillent pas, la tension superficielle pourrait empêcher le liquide de remplir tout l'espace entre les particules de sel. Par conséquent, après que le métal fondu soit injecté dans le moule, la pression devrait être conduite immédiatement pour faire le métal fondu remplir dans les espaces entre la préforme. La pression pourrait être négative ou positive. Après solidification, l'échantillon sera mis dans l'eau pour enlever la préforme. En conséquence, la structure interconnectée en mousse métallique peut être obtenue.

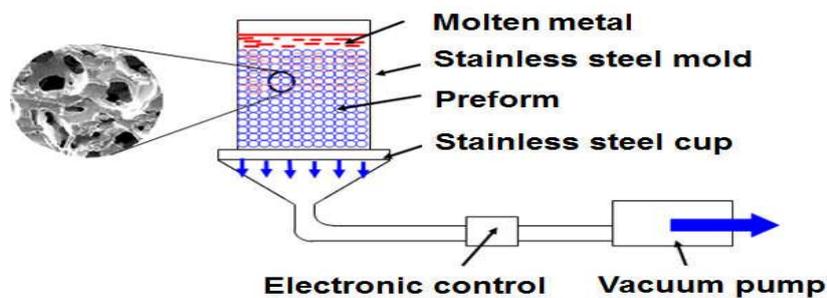
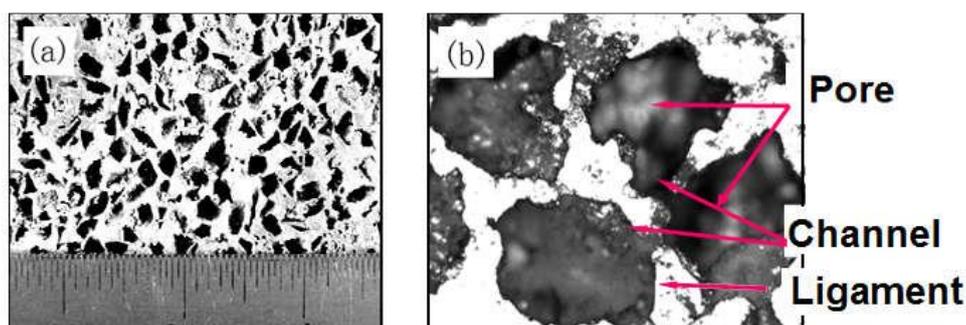


Figure 1.28 : Schéma de la méthode d'infiltration [45]

Les caractéristiques de structure (Les pores, les grands ligaments) de la mousse métallique préparée par le processus d'infiltration sont illustrées dans la figure 1.29. On peut voir que la structure des pores est basée sur la forme de la particule. Les pores, les grands ligaments métalliques et les canaux forment la mousse métallique à cellules ouvertes. Ce type de mousse métallique est généralement de porosité modérée et il a des bonnes propriétés mécaniques [46].



**Figure 1.29 : Caractéristiques de la structure de la mousse métallique préparée par la méthode d'infiltration (a) macrostructure (b) microstructure [45].**

## **1.8 Travaux de recherche**

Nous allons présenter dans ce qui suit un résumé de quelques travaux qui ont été réalisés sur les méthodes de fabrication simples des mousses d'aluminium à cellules ouvertes et sur les aspects mécaniques et thermo-physiques de ces matériaux. Dans la plupart des études, les propriétés mécaniques ont été déterminées par des essais de compression et pour les propriétés thermiques, il existe des études expérimentales, théoriques et numériques sur les échangeurs thermiques de mousses d'aluminium.

### **1.8.1 Processus de réplique (infiltration)**

La méthode de réplique (infiltration) par l'utilisation des particules de chlorure de sodium (sel) comme support d'espace pour fabriquer des mousses d'aluminium a été largement utilisée [5, 47]. On note que la taille des pores et la porosité peuvent être modifiées par modification de la préforme et la pression d'infiltration [47].

L'une des attractions de cette méthode est l'étude de Erardo et al. [48] révélant que le processus de fabrication est facile, peu coûteux et simple. Elle a fait l'objet d'une étude plus approfondie et deux nouvelles méthodes, l'infiltration de gaz seulement et l'infiltration mécanique. La méthode du gaz seulement a été adoptée en raison de sa reproductibilité et aussi de sa qualité. La méthode a été utilisée pour

fabriquer des échantillons sous diverses pressions d'infiltration pour des mousses dont les pores sont de 1 à 1,1 mm, 1,4-1,7 mm et 2,0-2,36 mm.

Au total, neuf mousses métalliques en aluminium ont été fabriquées pour les essais thermiques et sous pression. Les mousses fabriquées avaient trois tailles de pores différentes, 1-1,1 mm (appelés petits échantillons), 1,4-1,7 mm (appelés échantillons intermédiaires) et 2-2,36 mm (appelés grands échantillons). Les mousses fabriquées avaient une porosité comprise entre 0,62 et 0,65. Le schéma de la méthode des Erardo et al. [48] est présenté dans la Figure 1.30.

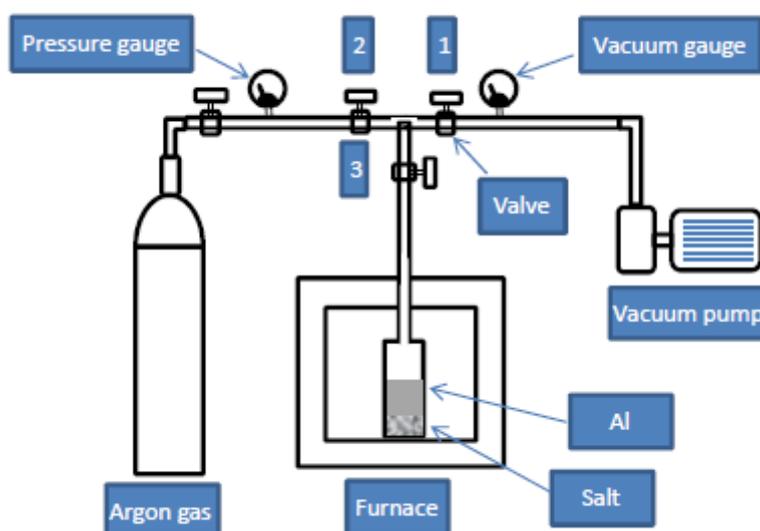


Figure 1.30 : Schémas du système de production [48].

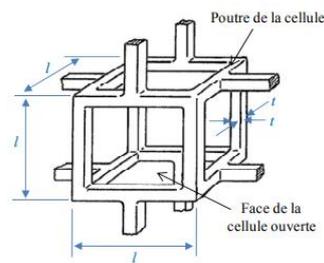
### 1.8.2 Tests de compression

Dans la plupart des études, les propriétés mécaniques ont été déterminées par des essais de compression. Les essais de compression sont nécessaires pour assurer des propriétés mécaniques minimales pour éviter les défaillances ou les dommages [9, 49]. De nombreuses études ont été réalisées pour étudier le comportement mécanique des mousses d'aluminium qui montrant que les propriétés sont déterminées par la densité relative et la géométrie des cellules [34, 50, 51]. Les propriétés des mousses métalliques dépendent de nombreuses caractéristiques morphologiques, telles que la distribution de la taille des pores, la courbure de la paroi cellulaire, les défauts, etc. Bien que la relation exacte entre les propriétés et la structure ne soit pas encore suffisamment connue, on suppose généralement qu'une distribution uniforme des pores convexes exempts de défauts est hautement souhaitable. La tâche de l'expérimentateur est de produire de telles structures. La tâche de l'expérimentateur

est de produire de telles structures. Un bref examen des mousses existantes montre qu'il existe encore un grand potentiel de développement, car celles-ci tendent souvent à être irrégulières.

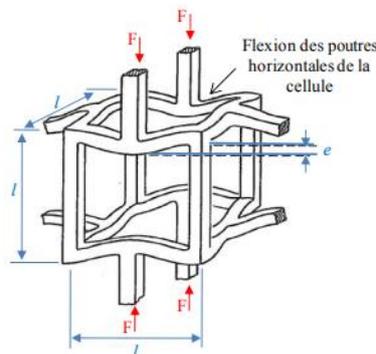
### 1.8.2.1 Propriétés mécaniques: modèle de Gibson et d'Ashby

La première étape consiste à simplifier la structure complexe d'une mousse à l'aide d'un modèle géométrique. Au niveau le plus simple, une mousse à cellules ouvertes peut être schématisée comme un réseau cubique de poutres (ou arêtes) de longueur  $l$  et d'épaisseur  $t$ . Les poutres ont une section carrée (Fig. 1.31). Les cellules adjacentes sont positionnées de façon à ce que leurs poutres soient connectées en leur milieu. Les formes cellulaires dans des mousses réelles sont, bien sûr, plus complexes que celle de la figure 1.31 mais leurs propriétés peuvent être comprises en utilisant les arguments dimensionnels qui omettent toutes les constantes résultant de la géométrie cellulaire spécifique



**Figure 1.31 : Cellule modèle utilisée pour décrire une mousse à cellules ouvertes. Les arêtes ont toutes une longueur  $l$  et une épaisseur  $t$ .**

Gibson et Ashby considèrent que dans le régime décrit par la théorie de l'élasticité, la mousse comprimée se déforme par flexion élastique des poutres horizontales (sans flambage des poutres verticales) (Fig. 1.32).



**Figure 1.32 : Fléchissement de parois cellulaires pendant la déformation linéaire-élastique [9].**

### **1.8.3 Propriétés thermiques**

Les mousses métalliques à cellules ouvertes, également, sont considérées comme l'un des meilleurs candidats pour améliorer le taux de transfert de chaleur et sont d'excellents matériaux pour les échangeurs de chaleur [52,53] en raison de leurs structures poreuses, qui peuvent améliorer le processus de transfert de chaleur. Les propriétés thermiques sont les paramètres thermiques suivants : conductivité thermique, le coefficient de transfert de chaleur, chaleur spécifique, etc. [52,54].

#### **1.8.3.1 Corrélation empirique de la conductivité thermique effective (CTE)**

La conductivité thermique efficace (CTE) des mousses à cellules ouvertes est l'un des paramètres thermo-physiques essentiels, qui pourrait influencer le transfert de chaleur par conduction dans le matériau [52,55]. Pour cette raison, certains modèles ont été adoptés pour déterminer CTE de la mousse métallique. Par exemple, les modèles proposés par Bhattacharya et al. [56] ont utilisé l'eau et l'air comme phase fluide dans les mousses d'aluminium. Ils ont proposé une corrélation empirique entre CTE et la porosité. Par contre, Boomsma et Poulikakos [57] ont proposé un modèle (CTE) basé sur une structure cellulaire idéalisée en trois dimensions de mousse métallique en utilisant la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur. Abuserwal et al. [58] ont proposé une corrélation empirique pour déterminer CTE. Ils ont conclu que CTE diminue avec l'augmentation de la porosité, mais il n'a pas trouvé l'influence de la taille des pores. Belcher et al. [59] ont proposé un polynôme de corrélation analytique de deuxième ordre pour CTE en fonction de la porosité. Wang et al. [60]. ont proposé un modèle fondé sur le développement de polynômes de deuxième ordre à diverses structures de mousse d'aluminium.

La figure 1.33 montre un diagramme schématique de l'appareil utilisé pour estimer la conductivité thermique effective. La méthode utilisée est l'état d'équilibre comparatif qui est largement utilisé pour mesurer CTE des matériaux poreux [61, 62, 63].

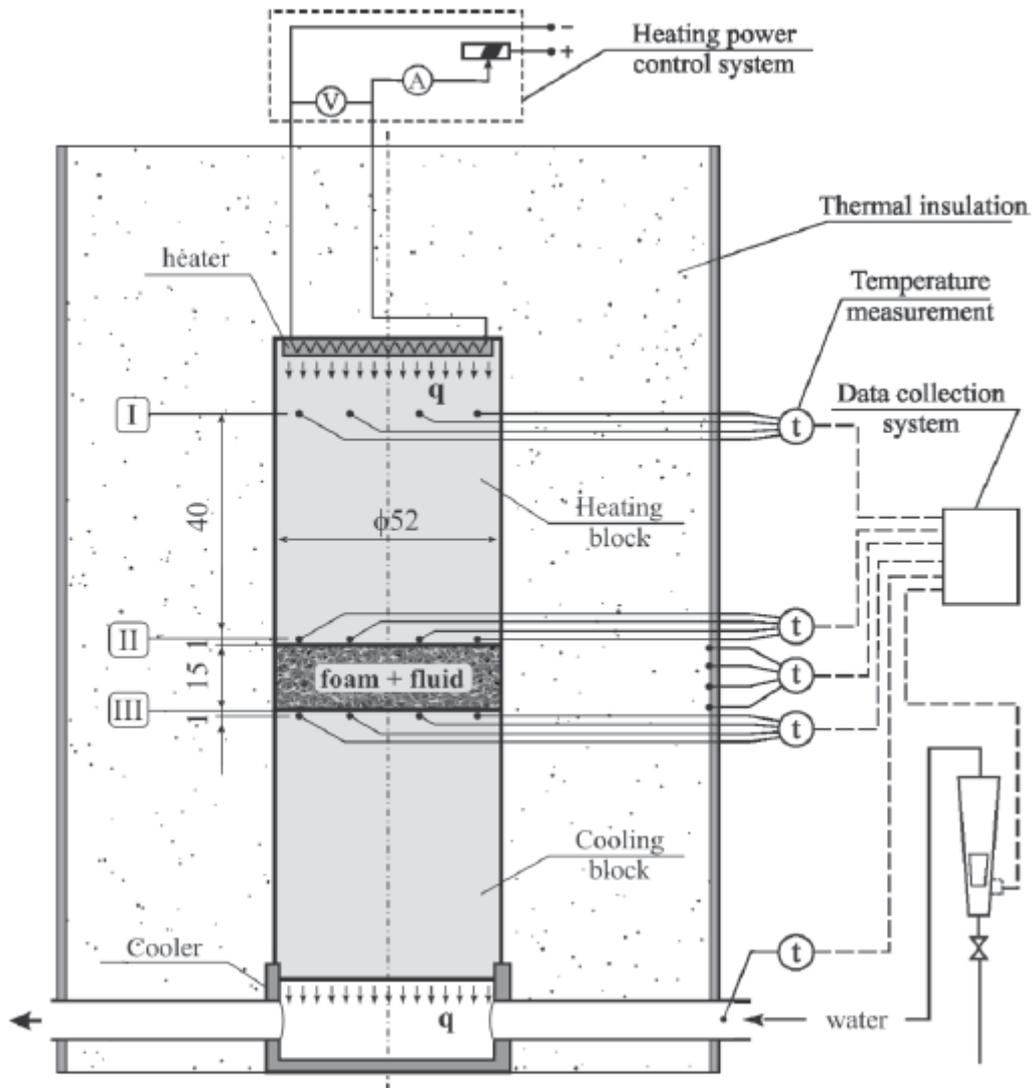


Figure 1.33 : Diagramme schématique d'une technique comparative d'état stable utilisée pour les mesures de conductivité thermique efficace [60].

Dans la plupart des expériences, ils ont placé un échantillon d'essai en mousse d'aluminium, sous forme de disque (52 mm de diamètre et 15 mm de hauteur), a été placé entre deux blocs cylindriques en aluminium de même diamètre que le disque d'échantillon en mousse. Les filaments squelettiques ont été collés avec les blocs avec l'utilisation d'une colle époxy-aluminium afin de réduire la résistance au transfert de chaleur sur les surfaces de contact échantillon-bloc. La surface orientée vers l'extérieur de l'un des blocs était munie du système de chauffage électrique, et la surface extérieure correspondante de l'autre bloc était refroidie à l'eau. Un réchauffeur de résistance plate en forme de disque a fait l'élément chauffant de bloc. Le réchauffeur et le refroidisseur ont été placés dans l'élément d'isolation en

polyuréthane pour minimiser les pertes de chaleur pour l'environnement. Des trous ont été percés dans les blocs et 12 thermocouples du type K d'un diamètre de 1 mm y ont été placés. Ils ont été utilisés pour enregistrer les changements de température à trois niveaux du banc d'essai. Quatre thermocouples ont été localisés aux deux surfaces de contact échantillon-bloc (niveau II et III). 4 thermocouples ont été installés à une distance de 51 mm de l'échantillon de mousse (niveau I).

Les thermocouples ont été disposés à différentes distances de l'axe vertical du support pour étudier le profil de distribution de la température sur la section transversale. De plus, 4 thermocouples étaient situés sur la surface extérieure de l'isolant – les lectures de ces points ont permis de déterminer les pertes de chaleur.

Les thermocouples ont été raccordés à des modules de mesure multicanaux spéciales qui ont été fournis avec les systèmes de référence de stabilisation-corrrection de la température. Ces modules, ainsi qu'un PC, formaient un système de collecte de données qui permettait d'observer les changements de température en temps réel à différents points et d'enregistrer les résultats sur un support de stockage de données. Le système de mesure de la température a été étalonné avant les essais. Tous les thermocouples ont été vérifiés pour leur performance à deux niveaux de température, c.-à-d. à la fonte de la glace et aux points d'ébullition de l'eau. Après étalonnage, l'indication de tous les thermo-éléments se situait à 0,2 K par rapport à température d'étalonnage. Les mesures ont été prises à quatre températures.

En ce qui concerne la direction du transfert de chaleur, le chauffage a été d'abord appliqué par le haut, puis par le bas. La température a été modifiée en ajustant la puissance de l'élément chauffant. Afin de modifier la puissance de chauffage, la tension d'alimentation du réchauffeur a été modifiée et le résultat a été vérifié avec l'utilisation d'un voltmètre et ampèremètre intégrés dans le système d'alimentation.

Une fois les conditions de transfert de chaleur stabilisées, les valeurs de température ont été enregistrées pour tous les points de mesure du système. Ils ont supposé que le système s'était stabilisé lorsque les différences température entre les niveaux I, II et III sont restées les mêmes pendant au moins 15 minutes. Comme la capacité calorifique du banc d'essai était élevée, chaque mesure a pris plus de 90 minutes en pratique. Deux séries de mesures ont été réalisées pour chaque système à mousse liquide avec un profil de température croissant, et une série avec un profil de température décroissant.

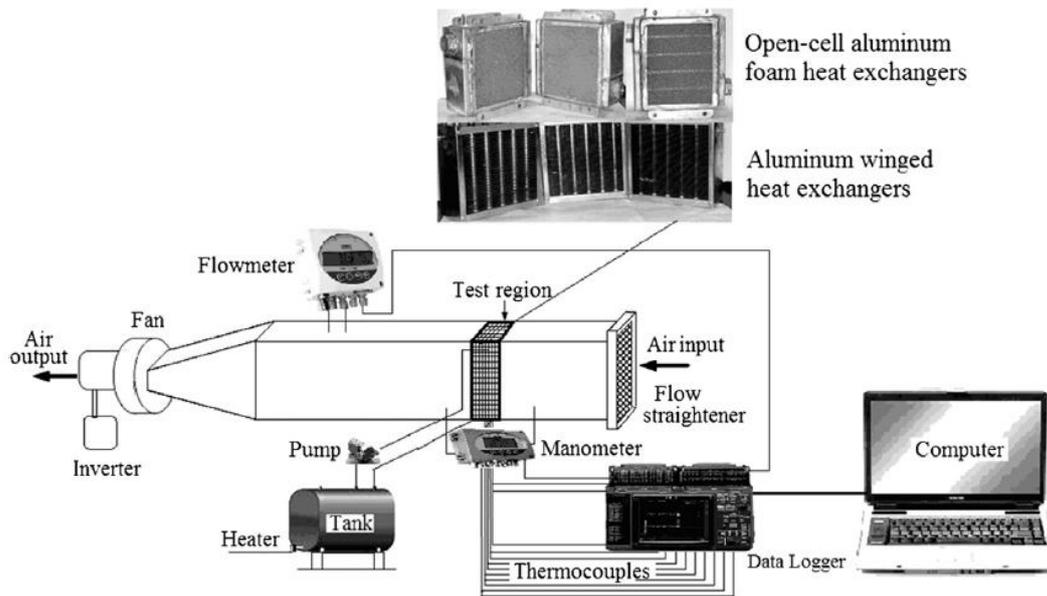
Le taux uniforme d'évacuation de la chaleur du système assuré par l'eau de refroidissement : sa température et son débit a été maintenus constant. Le débit d'eau mesuré par le débitmètre électronique de la turbine, et la surveillance de la température a été basé sur un thermocouple fonctionnant à l'entrée d'eau de l'élément de refroidissement.

### **1.8.3.2 Transfert de chaleur par convection forcée à travers des mousses d'Al**

Une grande partie de la recherche portait sur le transfert de chaleur par convection forcée pour diverses mousses métalliques à cellules ouvertes à haute porosité. Les travaux de recherche suivants traitent de certains des travaux les plus productifs sur l'étude de transfert de chaleur convective forcée. Boomsma et al. [52] ont mené une investigation expérimentale sur une mousse d'aluminium comprimé et transformée en échangeur de chaleur, pour estimer leurs performances et les comparer avec un autre échangeur de chaleur de la même taille conçue pour un usage similaire utilisé dans l'industrie, ils ont découvert que l'échangeur de chaleur de la mousse métallique réduisait la résistance thermique de près la moitié. Bhattacharya et Mahajan [56] ont étudié le transfert thermique par convection forcée sur des mousses d'aluminium à ailettes avec des porosités de 0,9 et 5-20 PPI (pores par pouce). Leurs résultats montrent que le coefficient de transfert de chaleur augmente lorsqu'il le nombre d'ailettes augmente en raison de la surface spécifique supplémentaire disponible pour le transfert de chaleur. Toutefois, cette augmentation a entraîné une baisse de pression importante. Kurtabas et Celik [64] ont étudié le flux uniforme de convection thermique à travers un canal rectangulaire avec des mousses d'aluminium avec différents PPI. Ils ont conclu que les mousses à haute densité poreuse améliorent considérablement le transfert de chaleur et que le nombre de Nusselt augmente proportionnellement avec PPI. Calmidi et Mahajan [65] ont présenté une étude expérimentale et numérique sur la convection forcée dans les mousses métalliques à haute porosité (0,89–0,97) pour estimer la dissipation thermique. Ils ont constaté que pour les combinaisons mousse-air, l'effet de la dispersion thermique est très faible dû la conductivité relativement élevée de la matrice solide. Cependant, les données montrent que la dispersion thermique peut être importante dans les combinaisons mousse-eau.

D'après Sertkaya et al. [66] qui ont fait une étude expérimentale sur la performance thermique des trois échangeurs à ailettes d'aluminium avec trois

échangeurs en mousse d'aluminium à cellules ouvertes. Les échangeurs de chaleur en mousse étaient de porosité 0.9, de PPI 10, 20, 30 et dimensions de 200x200x100 mm. Les échangeurs de chaleur à ailettes en aluminium avaient les mêmes dimensions que les échangeurs de chaleur en mousse et avaient des intervalles de 1.6, 3.2, 4.8 mm entre les ailettes. Ils ont utilisé des données expérimentales, pour étudier l'efficacité thermique par rapport la vitesse, perte de pression par rapport la vitesse, le facteur de frottement par rapport au nombre de Reynolds et le nombre de Reynolds par rapport au nombre de Nusselt. Le nombre de Reynolds utilisé dans les essais était d'environ  $5 \times 10^3$ - $9 \times 10^4$ . Ils ont constaté que, pour les deux types d'échangeurs de chaleur, à mesure que la vitesse du frigorigène augmente, l'efficacité diminue et la perte de pression augmente. L'efficacité était plus élevée avec des nombres de Reynolds inférieurs. Et ils ont constaté aussi que les échangeurs de chaleur à ailettes en aluminium transfèrent beaucoup plus de chaleur que leurs en mousse d'aluminium. La configuration expérimentale utilisée dans leurs études est illustrée dans la figure 1.34



**Figure 1.34 : Montage expérimental de Sertkaya et al [66].**

La figure 1.35 présente les résultats de leur expérience sur la variation de la perte de pression par unité de longueur en fonction de la vitesse des échangeurs de chaleur à ailettes en aluminium et en mousse d'aluminium à cellules ouvertes

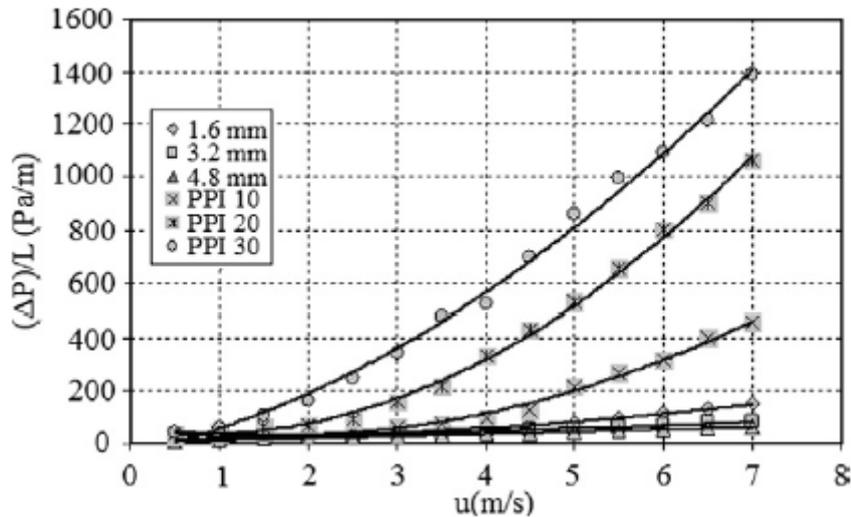


Figure 1.35 : Résultats de Sertkaya et al [66] de Perte de pression par rapport à la vitesse

### 1.8.3.3 Transfert de chaleur combiné dans les mousses d'aluminium

Dans le domaine de transfert de chaleur, les chercheurs considèrent que la mousse de métal à cellules ouvertes est un matériau prometteur pour échangeur de chaleur [52,53], parce que la surface de structure poreuse pourrait contribuer au processus de transfert de chaleur. La comparaison avec les ailettes métalliques traditionnelles, la mousse métallique possède une densité de surface similaire et résistance mécanique plus élevée [67]. Dans cette section, les propriétés thermiques des mousses métalliques sont introduites, y compris la conduction thermique et la convection.

Dans les échangeurs de chaleur, il est nécessaire d'étudier le transfert de chaleur combiné (conduction-convection), la conductivité thermique dans la partie solide et la convection thermique dans la partie fluide. Writz [68] a proposé un modèle semi-empirique de transfert de chaleur dans une mince paroi en mousse. Le modèle supposait un écoulement unidimensionnel de réfrigérant à travers la paroi poreuse et une conduction unidimensionnelle dans la matrice poreuse. Pour le même volume de l'échangeur de chaleur, la matrice poreuse fournissait une surface de transfert de chaleur plus grande que la bande d'ailettes. Sur la base d'une étude de transfert de chaleur par conduction-convection. Jefferson et al. [69] ont présenté un résumé des travaux de recherche récents sur les mousses métalliques à cellules ouvertes dont les pores mesurent environ 1 mm pour améliorer le transfert de chaleur et la conductivité thermique effective, ainsi qu'un résumé des recherches sur le transfert de chaleur par convection forcée à l'aide d'air et d'eau. Ils ont constaté que dans la distribution

homogène de la température, facilite le transfert de chaleur par conduction/convection et améliore la diffusivité thermique du composite métal/mousse, sont la raison principale pour améliorer le transfert de chaleur dans diverses applications.

Dukhan et al. [70] ont analysé un modèle de transfert de chaleur unidimensionnelle en mousse métallique à cellules ouvertes de porosité 0.9 et 10 PPI, où ils ont présenté un modèle d'hypothèse unidimensionnel combine la conduction dans les ligaments et la convection au liquide de refroidissement dans les pores. Dans leur étude, ils ont évité le modèle 3D de flux et de transfert de chaleur complexes dans la mousse. Ils ont constaté que la température au long de la mousse a été diminuée de façon exponentielle à la distance de la base chauffée. Et ils ont vérifié le modèle d'hypothèse unidimensionnelle par une expérience directe sur un échantillon de mousse d'aluminium mince de porosité 0.9 et 10 PPI pour différents nombres de Reynolds. Les résultats ont montré que la température au long de la mousse a baissé de manière exponentielle à la distance de la base chauffée, l'augmentation du nombre de Reynolds a augmenté le transfert de chaleur à une certaine limite et un bon accord entre les modèles.

La figure 1.36 montre les résultats de leur expérience avec la courbe de température unidimensionnelle par la distance dans la direction x.

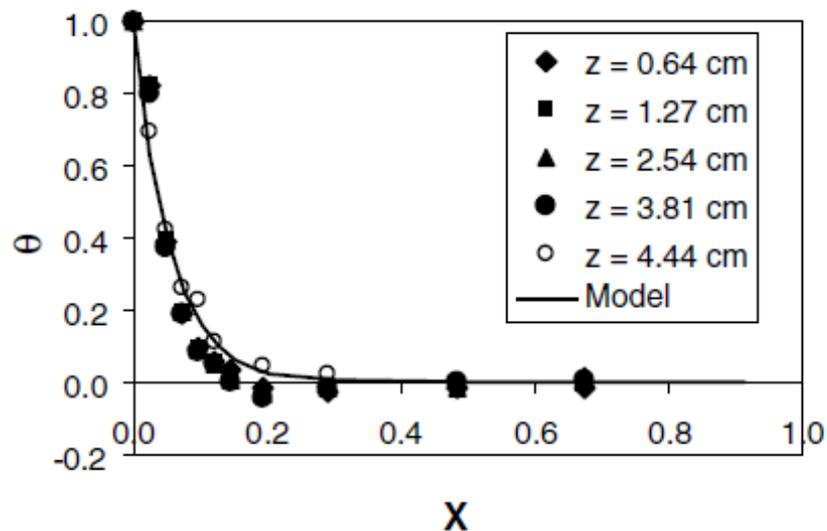


Figure 1.36 : Distribution de la température dans la direction de l'écoulement à  $Re = 75,7$  [71].

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu général des matériaux cellulaires, leurs caractéristiques, leurs applications et les différents processus de fabrication qui peuvent être classés selon l'état dans lequel le métal est traité et peuvent avoir un impact direct sur les propriétés mécaniques et thermiques. Parallèlement, il est important de ne pas négliger les grandeurs caractéristiques, surtout la porosité, la surface spécifique et la densité, car la plupart des études et recherches mécaniques ou thermiques dépendent de ces dimensions physiques. Ainsi, les travaux de cette étude visent à améliorer l'élaboration des mousses d'aluminium en optimisant la structure de la mousse métallique.

Vu l'ensemble des études réalisées sur l'amélioration du transfert de chaleur à l'aide des mousses métalliques. Il est clair que les performances de la mousse métallique seront une solution pratique pour des nombreuses applications industrielles, sur la base des résultats expérimentaux. Cela permet à de nombreux chercheurs de développer leurs connaissances sur la manipulation des mousses métalliques dans diverses applications de distribution de la température, le transfert de chaleur par conduction/convection et la résistance structurale des mousses métalliques. Des résultats indiquent que la compréhension des caractéristiques est encore insuffisante et qu'une analyse de l'effet de la porosité et la densité des pores ne sont pas clairs. En outre, les études numériques sur les mousses métalliques ont utilisé une approche théorique complexe et n'ont pas produit de résultats précis.

## Références

- [1] Ashby MF., Evans AG., Gibson L J., Hutchinson J W., Wadley HNG. Metal foams: a design guide. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] T. Filetin,, I. Kramer, and G. Marić, Metal foams: production, properties and application ,Faculty of Mechanical Engineering and Shipbuilding, Department of Materials, I. Lučića 5, 10000 Zagreb, 2003
- [3] Dipen Kumar Rajak, L.A. Kumaraswamidhas, and S. Das, Technical overview of aluminum alloy foam, Reviews on Advanced Materials Science, Vol. 48, 2017, 68-86.
- [4] S. Kim, and C.W. Lee, A Review on Manufacturing and Application of Open-cell Metal Foam, Procedia Materials Science, Vol. 4, 2014, 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.562>
- [5] J. Banhart, Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science, Vol., 46, 2001, 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- [6] J. Banhart, Metal foams: production and stability, Advanced Engineering Materials. Vol. 8, No. 9, 2006, 781-794. <https://doi.org/10.1002/adem.200600071>
- [7] D. Hierry, Caractérisation et simulation numérique du comportement mécanique des mousses de Nickel: morphologie tridimensionnelle, réponse élastoplastique et rupture, These de doctorat, Ecole Nationale des Mines de Paris, 2004.
- [8] J. Banhart, and W. Denis, On the Road Again: Metal foams find favor, American Institute of physics, Vol. 55, No. 7, 202, 37-42. <https://doi.org/10.1063/1.1506749>
- [9] L.J. Gibson, and M.F. Ashby, Cellular solids: structure and properties. second edition Cambridge University, 1999.
- [10] S. Benjamin, Process for making foamlike mass of metal, United States Patent No.2, pp. 434-775, 1998.
- [11] G.A. Lara-Rodriguez, I.A. Figueroa, M.A. Suarez, O. Novelo-Peralta, I. Alfonso, R. Goodall, A replication-casting device for manufacturing open-cell Mg foams. J. Mater. Process. Technol. Vol. 243, 2017, 16–22. [CrossRef]
- [12] B. Rousseau, J.Y. Rolland, P. Echegut, E. Brun, and J Vicente, Numerical prediction of the radiative behavior of metallic foams from the microscopic to macroscopic scale, International Journal of Physics : Conference Series 369.1 (2012), p. 012003.
- [13] C. Curado, J. Ferreira, B. Lefevre, J. Piccot, mousses métalliques, Projet MA15, UTT
- [14] Nield D.A., Bejan A., Convection in Porous Media, Fourth Edition, Springer, New York, 2013.
- [15] J. P. Gibb, M. J. Barcelona, J. D. Ritchey, and M. H. LeFaivre, Effective Porosity of Geologic Materials first annual Report, Illinois State Water Survey, 1984
- [16] H. Liao, Basic Characteristics and Engineering Classification of Soils, world scientific, 2020, 1-29. [https://doi.org/10.1142/9789813238510\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789813238510_0001)
- [17] Y.Y. Raja, and E.S. Prakash, Experimental determination of relative density and percentage porosity of open-cell aluminum foam produced from sand salt mould method volume & issue, International Journal of Engineering Research & Technology, 05, 04, 2016 [18] Nield D.A., Bejan A., Convection in Porous Media, Fourth Edition, Springer, New York, 2013.

- [18] J. Grosse, B. Dietrich, G. Incera Garrido, P. Habisreuther, N. Zarzalis, H. Martin, M. Kind, and B. Kraushaar-Czarnetzki, Morphological Characterization of Ceramic Sponges for Applications in Chemical Engineering, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, No. 23 2009, 10395–10401. <https://doi.org/10.1021/ie900651c>
- [19] A. Inayat, H. Freund, Zeiser T, W. Schweiger, Determining the specific surface area of ceramic foams: The tetrakaidecahedron model revisited, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 6, 2011, 1179-1188. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.12.031>
- [20] B. Alazami, and K. Vafai, Analysis of Variable Porosity, Thermal Dispersion, and Local Thermal Nonequilibrium on Free Surface Flows through Porous Media. *J. Heat Transf.* 2004, 126, 389–399. DOI: 10.1115/1.1723470
- [21] S. Woudberg, and F. Smit, Comparative Analysis of Geometric Models for Predicting the Dynamic Specific Surface of Foamlike Media, *Proceedings of the 5th International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering*, 2014.
- [22] S. Donmus, M. Mobedi, and F. Kuwahara, Double-Layer Metal Foams for Further Heat Transfer Enhancement in a Channel, *Energies*, Vol. 14, No. 3, 2021, 672. <https://doi.org/10.3390/en14030672>
- [23] J. Ohser, C. Redenbach, A. Moghiseh: The PPI value of open foams and its estimation using image analysis, *International Journal of Materials Research*, Vol. 105, No. 7, (2014), 671-678. <https://doi.org/10.3139/146.111051>
- [24] V.V. Calmidi, *Transport Phenomena in High Porosity Fibrous Metal Foams*. Ph.D. Thesis, University of Colorado, 1998.
- [25] R. Abed Mahdiab , H. A. Mohammedc , K. M. Munisamy and N. H. Saeidd , Experimental and Numerical Investigation of Combined Convection Heat Transfer and Fluid Flow around Circular Cylinder through Rectangular and Trapezoidal Open-Cell Aluminum Foams, *Chemical Engineering Communications*, Vol. 202, No. 5, 2015. DOI: 10.1080/00986445.2013.863188
- [26] J.G. Berryman, Confirmation of Biot’s theory, *Applied Physics Letters*, Vol. 37, 1980, 382–384
- [27] V. Belandria, A.M. Billet, M. Debacq, O.Lecoq, E. Schaer, *Génie de la Réaction Chimique : les réacteurs polyphasiques*, Master. France, 2018
- [28] A. Inayat, M. Klumpp, M. Lammermann, H. Freund, and W. Schwieger, Development of a New Pressure Drop Correlation for Open-Cell Foams Based Completely on Theoretical Grounds: Taking into Account Strut Shape and Geometric Tortuosity, *Chemical Engineering Journal*, 2015.
- [29] O. Wiener, “The Theory of Mixtures for Fields with Constant Currents, *Akademie der Wissenschaften.*, pp. 32-507, 1912.
- [30] Ferrouillat S., *Etude du micro-mélange pour la caractérisation des performances d’échangeurs-réacteurs compacts multifonctionnels*, Doctorat de l’école polytechnique de l’université de Nantes, (2004).
- [31] F. García-Moreno: Manufacture, commercial applications of metal foams, their properties and production, *Journal Materials*, Vol. 9, No. 2, (2016), 559–632. <https://doi.org/10.3390/ma9020085>
- [32] Jean Sebastien Blazy. *Comportement mécanique des mousses sous solidification complexes et simulations numériques dans le cadre de l’élasto-plasticité compressible*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.

- [33] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara: ALPORAS aluminum foam: Production process, properties, and applications *Advanced Engineering Materials*, 2 (2000), pp. 179-183 and Shinko Wire Co, Japan, 1995 – 2010 data sheets and presentations.
- [34] J. Banhart, Aluminum foams for lighter vehicles, *International journal of vehicles design*, Vol. 37, Nos. 2/3, 2005.
- [35] S. Pickering, *Metal Powder Report*, 53, 24, 1998.
- [36] VA. Ettl, *Taipeh Battery Forum*, 1999.
- [37] J. Babjak, VA. Ettl, V. Paserin, US Patent 4,957,543, 1990.
- [38] Inco Ltd, Product data sheet of “Incofoam”, Canada, 1998. <http://www.inco.com>
- [39] P. Liu, and GF. Chen, *Porous Materials, Processing and Applications*, Elsevier Science, 2014.
- [40] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, and A. Kitahara, Porous and cellular materials for structural applications, In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. *MRS Symp. Proc.*, vol. 521, 1998, 133.
- [41] J. Baumeister, Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999, 113
- [42] LA. Cohen, WH. Power, ,and DA. Fabel, *Mater. Eng.*, 67, 44, 1968
- [43] K. Berchem, U. Mohr, and W. Bleck, Controlling the degree of pore opening of metal sponges, prepared by the infiltration preparation method, *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 323 (2002) 52-57.
- [44] S. Marchi, and A. Mortensen, Infiltration and the Replication Process for Producing Metal Sponges. In: *Handbook of Cellular Metals*. Degischer HP, Kriszt B, ed., Wiley-VCH, Chapter 2.06, 2002, 44–56
- [45] A. Merabtine, N. Gardan, J. Gardan, H. Badreddine, C. Zhang, F. Zhu, and X. L. Gong, Experimental and numerical thermal analysis of open-cell metal foams developed through a topological optimization and 3D printing process, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 83, 2018. DOI: 10.1051/epjap/2018180060
- [46] Y. Su, Analytical and numerical modeling of structure of metal porous polymer composite and its mechanical behaviors, in: *LASMIS, UTT, Troyes, France*, 2011.
- [47] R. Goodall, J.F. Despois, A. Marmottant, L. Salvo, and A. Mortensen, The Effect of preform processing on replicated aluminum foam structure and mechanical properties, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 12, (2006), 2069–2073. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.03.003>
- [48] M. Erardo, L. Elizondo, B. Farzad, W. Robert, and G. Russell, Casting protocols for the production of open-cell aluminum foams by the replication technique and the effect on porosity, *Journal of Visualized Experiments*, Vol. 94, 2014. DOI: 10.3791/52268
- [49] S.K. Maiti, L.J. Gibson, and M. F. Ashby, Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids, *University of British Columbia, Vancouver B.C., Canada*, 1984.
- [50] B.H.G Jigh, H.H. Toudeshky, and M.A. Farsi, Experimental and multi-scale analyses of open-celled aluminum foam with hole under compressive quasi-static loading. *J. Alloy. Comp.*, 695, 2017, 133–141.
- [51] B. Soni, and S. Biswas, Evaluation of mechanical properties under quasi-static compression of open-cell foams of 6061-T6 Al alloy fabricated by pressurized salt infiltration casting method, *Mater. Char.*, 130, 2017, 198–203.

- [52] K. Boomsma, D. Poulikakos, and F. Zwick, Metal foams as compact high performance heat exchangers, *Mech. Mater.*, vol. 35, 2003, 1161-1176.
- [53] S. Mellouli, H. Dhaou, F. Askri, A. Jemni, and SB. Nasrallah, Hydrogen storage in metal hydride tanks equipped with metal foam heat exchanger, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34, 2009, 9393-9401.
- [54] C.Y. Zhao, and Z. Wu, Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 95, 2011, 636-643.
- [55] X.H. Han, Q. Wang, Y.G. Park, C. Joen, A. Sommers, and A. Jacobi, A review of metal foam and metal matrix composites for heat exchangers and heat sinks, *Heat Transf. Eng.*, 33, 2012, 991–1009.
- [56] A. Bhattacharya, V.V. Calmidi, and R.L. Mahajan, Thermophysical properties of high porosity metal foams, *international journal of heat and mass transfer*, 45, 2002, 1017–1031.
- [57] K., Boomsma, and D. Poulikakos, On the effective thermal conductivity of a three dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *Int. J. Heat Mass Transfer* 44, 2001, 827–836.
- [58] A.F. Abuserwal, E.M. Elizondo Luna, R. Goodall, and R. Woolley, The effective thermal conductivity of open cell replicated aluminum metal sponges. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2017, 1439-1448. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.023>
- [59] T. Belcher, and G. Schunk, Thermal characterization of 3D printed lattice structures. *Thermal & fluids analysis workshop. TFAWS*, Hampton, VA., 2019.
- [60] N. Wang, I. Kaur, P. Singh, and L. Li, Prediction of effective thermal conductivity of porous lattice structures and validation with additively manufactured metal foams, *Applied Thermal Engineering*, Vol.187, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116558>
- [61] JW. Paek, BH. Kang, SY. Kim, and JM. Hyun, Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. *International Journal of Thermophysics*, 21, 2, 2000, 453-464.
- [62] R. Dyga, and S. Witczak, Investigation of effective thermal conductivity aluminum foams. In *Procedia Engineering*, 2012.
- [63] D. Thewsey, and Y. Zhao, Thermal conductivity of porous copper manufactured by the lost carbonate sintering process. *physical status solid a applications and materials science.*, 205, 5, 2008, 1126.
- [64] I. Kurtbas, and N. Celik, “Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 52, no. 5-6, pp. 1313–1325, 2009, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.050
- [65] V.V. Calmidi, and R. L. Mahajan, “Forced convection in high porosity metal foams,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 122, no. 3, pp. 557–565, 2000, doi: 10.1115/1.1287793
- [66] A. A. Sertkaya, K. Altınışık, and K. Dincer. “Experimental investigation of thermal performance of Aluminum finned heat exchangers and open-cell aluminum foam heat exchangers,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 36, pp. 86–92, 2012, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.08.008.
- [67] C.Y. Zhao, Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2012, 3618-3632.
- [68] RA Writz, A semi-empirical model for porous media heat exchanger design, *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers National Heat Transfer Conference*, Baltimore, MD, 1997.

[69] R.B, Jefferson, M. Stephen, G.A. Lazarus, and W. Somchai, Comprehensive case study on heat transfer enhancement using micro pore metal foams: From solar collectors to thermoelectric generator applications, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101333>.

[70] N. Dukhan, and K. C. Chen, Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 32, no. 2, pp. 624–631, 2007, [doi:10.1016/j.expthermflusci.2007.08.004](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.08.004).

**Chapitre 2**  
**Fabrication et Analyse des Défauts de la Mousse**  
**d'Aluminium**

## 2-1 Introduction

Dans ce chapitre, le processus de fabrication de la mousse d'aluminium est présenté. La méthode d'infiltration est appliquée dans cette étude pour préparer la mousse d'aluminium à cellules ouvertes. Dans ce chapitre, le montage utilisé pour la fabrication de la mousse sera présenté et on montre aussi les problèmes qui ont été rencontrés pendant l'élaboration de nos mousses métalliques.

## 2.2 Étapes du protocole général de réplcation (infiltration)

### 2.2.1 Les équipements et matériaux nécessaires

Dans ce travail, les équipements expérimentaux et les protocoles qui ont été utilisés pour produire les mousses d'aluminium par le processus d'infiltration, sont relativement faciles à mettre en œuvre.

Afin de produire la mousse d'aluminium à cellules ouvertes, le banc d'essai (Fig. 2.1) a été utilisé. Il se compose d'une bouteille de gaz argon pour l'injection de gaz ; d'une pompe à vide qui servait à réaliser une dépression inférieure à 10 mbar dans le moule pour : éviter l'oxydation d'aluminium, faciliter l'infiltration d'aluminium fondu entre les particules, empêcher le sel de réagir avec l'oxygène ; Four et deux moules en inox, l'un de dimensions 70 x 70 x 400 mm et l'autre de diamètre 60 et de hauteur 200 mm (Fig. 2.2). Tous, ils étaient reliés par des tuyaux en acier inoxydable, via des vannes et des raccords appropriés. La pression du gaz a été contrôlée à l'aide d'un manomètre et d'un vacuomètre à aiguille. La pression d'argon peut être réglée jusqu'à 10 bars et le débit d'argon de la bouteille peut également être contrôlé.

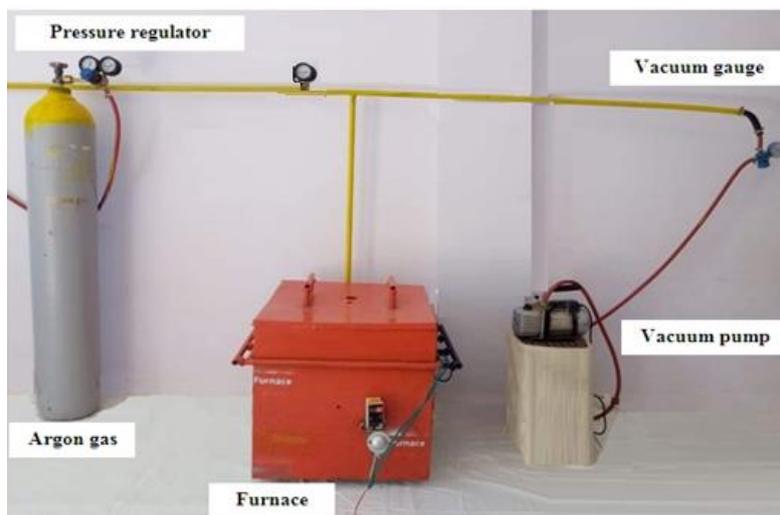


Figure 2.1 : Plate-forme de fabrication de mousse

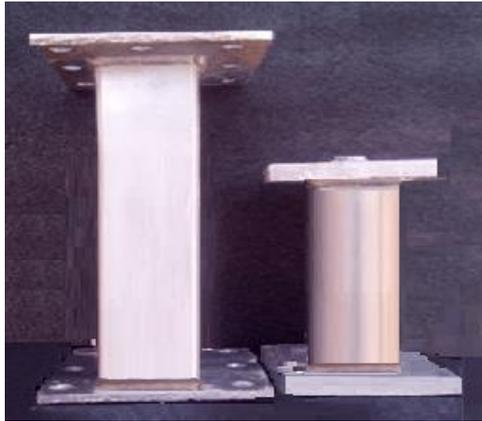


Figure 2.2 : Moules de forme cylindrique et bloc rectangulaire.

Le type d'aluminium choisi est Al99.5 des propriétés physiques sont récapitulées dans le tableau 2.1.

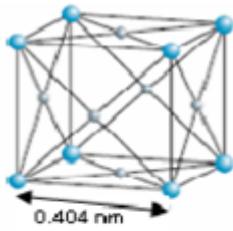
Réseau cristallin CFC	
Masse molaire	27 g.mol <sup>-1</sup>
Température de fusion	660°C
Point d'ébullition	2056°C
Densité à 20°C	2,7
Résistivité électrique	2,7.10 <sup>-8</sup> Ω.m
Conductivité thermique	202 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Chaleur spécifique massique	9,102 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Coefficient de dilatation (état solide)	24.10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Module d'élasticité	69 000 MPa

Tableau 2.1 : Principales propriétés physiques de l'aluminium [1].

### 2.2.2 Préparation préforme

La première étape du processus de fabrication de la mousse par infiltration consiste à préparer la préforme. La préforme est la forme négative de la mousse, car elle remplit tout l'espace qui deviendra pores. La structure de la mousse peut être modifiée en utilisant différentes formes et tailles des matériaux préformés.

Le matériau préformé doit remplir trois conditions principales [2] :

- 1- A un point de fusion plus élevé que le métal coulé.
- 2- Être chimiquement stable au contact du métal en fusion.
- 3- Facile à enlever une fois le métal solidifié.

Pour notre sujet de recherche, on a choisi le chlorure de sodium qui remplit toutes ces conditions. Son point de fusion est de 801 °C [3] et il est chimiquement inerte au contact de l'aluminium pendant l'infiltration et la lixiviation. De plus, le fait de le retirer de la mousse ne crée pas de sous-produits toxiques ou dangereux [2].

Pour cela, on a pris du sel de roche ordinaire et que ses propriétés sont énumérées dans le tableau 2.2. Premièrement, il a été broyé et ensuite tamisé pour obtenir la taille désirée de notre préforme. Pour obtenir des particules de sel dans la gamme requise, la poudre de sel a été passée par plusieurs catégories de tamis. Une vue schématique de l'ordre des tamis est présentée dans la figure 2.3.

Matériel	Propriété	Valeur
sel	Densité	2200 kg m <sup>-3</sup>
	Conductivité thermique	7 Wm <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>
	Chaleur spécifique	880 Jg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>

**Tableau 2.2 : Propriétés de sel**

<b>3.0 mm</b>
<b>2.0 mm</b>
<b>1.5 mm</b>
<b>1.0 mm</b>

**Figure 2.3: L'ordre des tamis utilisés pour séparer la taille des particules.**

La poudre du sel broyé a été versée dans le premier tamis et qui a été secoué pour séparer les particules. Comme on peut le voir dans la figure 2.3, les particules qui sont restées dans le tamis inférieur ont été utilisées pour fabriquer la mousse. Par exemple, les particules restées dans le tamis 2,00 mm avaient la taille entre 2,00 mm et 3,00 mm. Les trois tailles de particules de sel utilisées dans cette étude étaient celles dans les tamis inférieurs de la figure 2.3.

Les échantillons de mousse métallique produits à l'aide de particules de NaCl dont la taille varie de 1,5 à 2,0 mm ont été utilisés (Fig. 2.4).



Figure 2.4 : Poudre de NaCl formée de particules de taille qui varie entre 1,5 mm et 2,0 mm.

### 2.2.3 Processus de Production des mousses

Le processus d'infiltration a été utilisé pour la fabrication des mousses métalliques, cette technique se compose de trois étapes : injection, Infiltration et Solidification (Fig. 2.5). La méthode consistait à utiliser des particules de chlorure de sodium (sel) comme support d'espace pour faire la forme intérieure de la mousse [4-6]. La méthode sel-aluminium est développée par Seliger et Deuther [7] et son avantage est qu'elle est moins coûteuse. De plus, le sel n'est pas toxique et facile d'enlever avec l'eau. On note que la porosité et la taille des pores peuvent être modifiées suite à la taille des particules, la densité de la préforme et la pression d'infiltration [4]. Dans cette étude, les mousses d'aluminium ont été fabriquées par la méthode sel-aluminium. Pour des mousses de différentes tailles de pores, trois tailles différentes des particules de sel (1-1.5 mm, 1.7-2 mm et 2-3 mm) ont été utilisées. La préforme s'est faite en versant le sel dans un moule, de sorte que l'aluminium fondu s'infiltrait ensuite dans la préforme. La méthode d'infiltration a été améliorée et développée tout au long de cette étude.

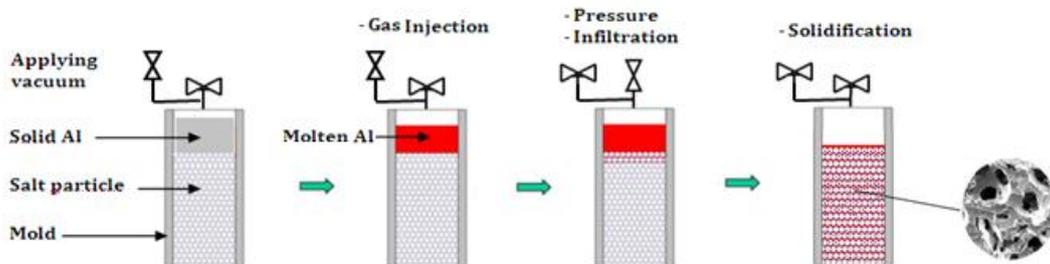


Figure 2.5 : Etapes principales de production du mousse d'aluminium à cellule ouvert

#### **2.2.4 Les étapes du processus :**

Les étapes d'élaboration de la mousse d'aluminium sont les suivantes :

1. La poudre de NaCl à infiltrer est introduite dans le moule.
2. Des morceaux d'aluminium sont placés dans le moule et sur la préforme NaCl.
3. Un joint en graphite dans la rainure du couvercle du moule.
4. Fixation des goujons en acier inoxydable
5. Fixation de la partie supérieure du couvercle au système de soupape
6. Fermeture de toutes les vannes du système.
7. Ouverture de la vanne menant à la pompe à vide et au moule
8. La pompe à vide est mise en marche jusqu'à la pression la plus basse possible.
9. la pompe à vide est arrêtée.
10. Si la perte de vide dans le système est inférieure à un taux de 50 mbar pendant les 10 premières secondes après l'arrêt de la pompe à vide, à ce moment le joint est suffisamment bon pour l'infiltration.
11. Sans débrancher le système de soupape, on place le moule dans le four préchauffé et attendre une heure, jusqu'à point de fusion (680°C) de l'aluminium.
12. la vanne de pompe à vide est fermée
13. La vanne du réservoir d'argon est ouverte et ensuite, on règle la pression et le débit d'infiltration à l'aide des vannes de régulation.
14. Après 3 min, la vanne de la bouteille d'argon est fermée
15. Après 5 min, le moule est retiré du four et ensuite placé sur une surface de refroidissement (dans ce cas, un bloc de laiton).

Remarque :

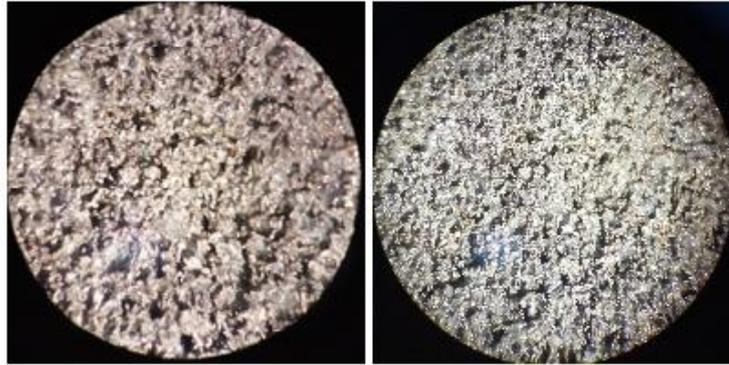
Pendant le processus de refroidissement, la pression dans le système peut changer au début, de sorte que la pression indiquée par le régulateur doit être surveillée et ajustée si nécessaire.

16. Après 30 minutes, le système de soupape est détaché, puis on dévisse le couvercle
17. Extraction d'échantillons du moule. On note qu'on obtiendra un composite aluminium-sel, comme il est illustré dans la figure 2.6.
18. Enfin, pour extraire le sel de l'échantillon élaboré, on place la mousse infiltrée dans un bécher d'eau pour dissoudre la préforme NaCl.

**Remarque :**

Pour assurer qu'il ne reste plus de NaCl dans la mousse, l'eau a été changée plus de 10 fois jusqu'à ce que le NaCl soit complètement retiré de la mousse. Il est

également important de contrôler périodiquement le poids de l'échantillon après une brève phase de séchage



**Figure 2.6 : Photos des échantillons composite aluminium/sel des mousses d'aluminium à cellules ouvertes**

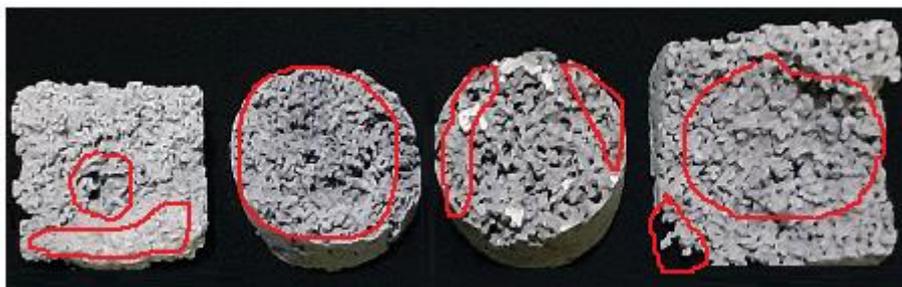
### 2.2.5 Les essais de production

Dans cette méthode, un tiers de la taille du moule a été rempli par les particules de NaCl avec une taille choisie et un tiers de la taille de la barre solide d'aluminium. La taille de la barre d'aluminium placée sur le dessus de la préforme est nécessaire pour une infiltration réussie. L'air à l'intérieur du moule a été enlevé à l'aide d'une pompe à vide et toute fuite a été vérifiée. Le gaz d'argon est ensuite injecté sous une pression dans le moule après la fusion d'aluminium  $\sim 680$  °C. La pression idéale d'infiltration est vitale pour la fabrication des bons échantillons.

Pendant le processus de fabrication, des défauts dans les échantillons sont souvent détectés

### 2.2.6 Défauts dans la mousse d'aluminium produits

Dans le processus de fabrication, il y a généralement des défauts dans les échantillons et ces défauts apparaissent comme indiqué sur la figure 2.3. En raison de la complexité du processus d'infiltration, le processus est décrit et théoriquement analysé pour déterminer les causes des défauts.



**Figure 2.7 : Défauts dans les échantillons de mousse d'aluminium**

## 2-3 Théorie du processus d'infiltration

Dans le traitement de processus d'infiltration, l'aluminium fondu est infiltré dans une préforme poreuse sous pression injectée, fournie par un gaz inerte. Après l'injection et l'infiltration, il intervient l'étape de solidification qui permet d'obtenir la forme finale de la mousse.

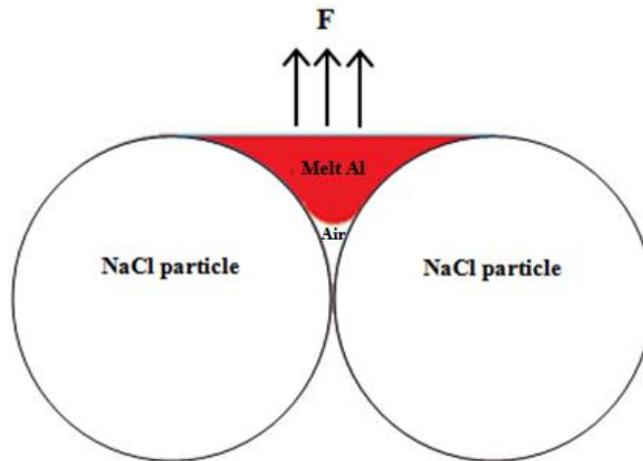
L'infiltration de l'aluminium fondu à travers les particules de sel est un processus complexe, car il implique le flux multiphase (gaz et liquide). En outre, le processus d'infiltration pourrait également être affecté par plusieurs facteurs : taille de la préforme, la température et la pression [8-10]. Ces travaux de recherche ont été basés principalement sur la loi capillaire et la loi Darcy, qui sont deux théories utiles pour mieux contrôler le processus d'infiltration.

### 2.3.1 La Pression de seuil

Une pression minimale est requise pour que l'infiltration se produise lorsque l'aluminium fondu ne mouille pas le NaCl. Il y a une force ascendante ( $F$ ) générée par la tension superficielle et le phénomène de non-mouillante qui empêche le liquide de se remplir l'espace vide par gravité, comme il est présenté dans la figure 2.8. Ainsi, afin de surmonter la tension superficielle, une pression minimale doit être effectuée et qui est appelée la pression de seuil  $P_{th}$ . Si les particules préformes sont traitées comme des sphères, les pertes de frottement et les effets de gravité sont négligés, la pression de seuil est égale la pression capillaire :  $P_{th} = P_c$ , et l'expression de la pression de seuil peut être prédit avec précision à l'aide d'une équation dérivée de la loi capillaire [11-15] :

$$P_{th}=P_c = 6\lambda \cdot \gamma \cos \alpha \frac{V_P}{d_s(1-V_P)} \quad (2-1)$$

Où  $\gamma$  est la tension superficielle du liquide d'aluminium ;  $\alpha$  est l'angle de contact à l'interface liquide/solide;  $V_P$  est la fraction du volume des particules ;  $d_s$  est le diamètre moyen des particules et  $\lambda$  est un facteur géométrique introduit pour décrire les écarts par rapport à la sphéricité et à la rugosité de la surface.



**Figure 2.8 : Schéma du phénomène de non mouillage entre l'aluminium fondu et les particules de sel [16]**

L'écoulement capillaire est similaire à d'autres types d'écoulements hydrauliques causés par une différence de pression. Le mouvement spontané du front d'écoulement apparaît pour réduire le gradient de pression en diminuant la quantité d'énergie de surface au contact entre le solide et le liquide. L'écoulement cesse lorsque la différence de pression devient nulle.

Dans le processus de fabrication, la valeur de la pression de seuil est d'abord estimée, et la pression appliquée doit être supérieure à cette valeur. Dans notre expérience, la valeur de  $V_p$  n'a aucune relation avec la taille des particules, et il est toujours à environ de 0,7 sans compactage. Ainsi, si  $V_p$  est fixé à une valeur constante, la pression de seuil est en fonction de la taille des pores. La tension superficielle  $\gamma$  et l'angle de contact sont de  $0,86 \text{ N m}^{-1}$  [17] et  $152^\circ$  [18], respectivement, et le facteur  $\lambda \cdot \cos \alpha$  pour des données calculées à partir de la pente d'une ligne ajustée et avec  $\gamma$  de  $0,86 \text{ N/m}$  pour l'aluminium pur, est de 2,9 [19].

Pour notre étude, les résultats du calcul de  $P_{th}$  sont présentés dans la figure. 2.9. On constate que la pression de seuil diminue quand la taille des particules de sel augmente. Ainsi, pour les petites particules, une grande pression doit être effectuée pour pénétrer l'aluminium fondu dans le milieu poreux.

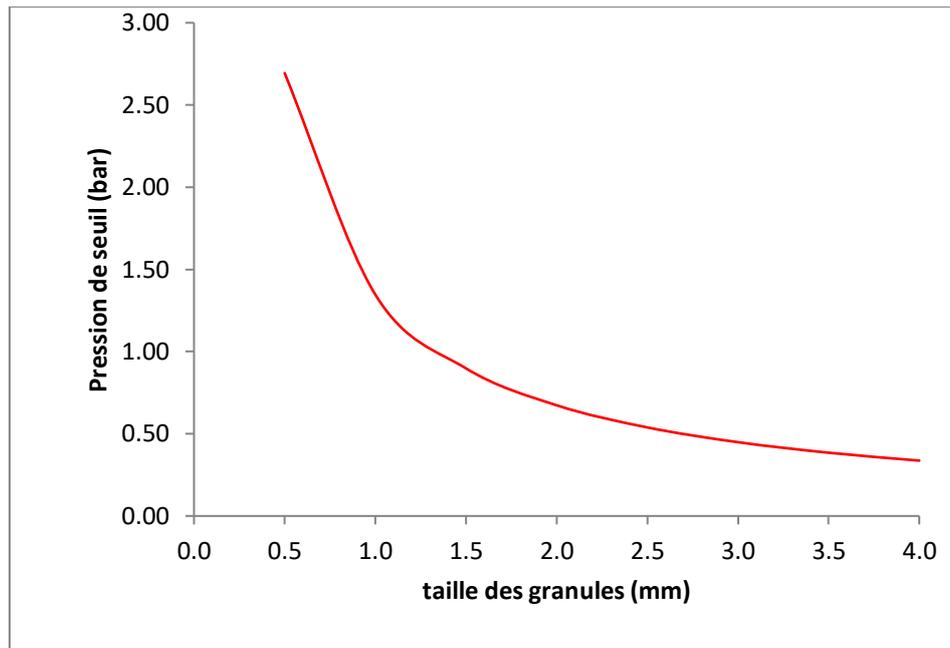


Figure 2.9 : La Pression de seuil ( $P_{th}$ ) en fonction de la taille des particules.

### 2.3.2 Le gradient de pression

La loi de Darcy est l'une des théories les plus importantes, qui révèle la relation entre la vitesse d'écoulement et le gradient de pression dans les milieux poreux. L'expression est la suivante :

$$\left(-\frac{dP}{dx}\right) = \frac{\mu}{K} u \quad (2-2)$$

Où,  $u$  est la vitesse ;  $\mu$  est la viscosité ;  $P$  est la pression ;  $K$  est la perméabilité.

Cependant, la forme classique de la loi de Darcy, comme la montre dans l'équation (2.2), est déduite dans la condition que la zone poreuse est entièrement remplie de liquide. En fait, le processus d'infiltration traité comme un processus que le liquide remplace le lieu de l'air dans les milieux poreux.

Supposons que les granulés de NaCl sont de forme sphérique avec un rayon uniforme  $R$ . Par conséquent, une mauvaise mouillabilité du NaCl par l'aluminium fondu au contact entre les granulés de NaCl les plus proches conduit à la formation de poches d'air (Figure 2.10a). Le processus d'infiltration implique le mouvement du flux biphasé dans la préforme. En raison de la tension superficielle et le phénomène de non-mouillage, l'espace vide ne pouvait pas être complètement occupé par le liquide. Pour analyser le processus d'infiltration du flux non saturé, la perméabilité est introduite dans la loi de Darcy [20] et la nouvelle équation s'appelle la loi de Darcy étendue, telle qu'elle est donnée par :

$$\nabla P = - \frac{\mu}{K_s K_r} u \quad (2-3)$$

Où :  $\nabla P$  (Pa/m) représente le gradient de pression ;  $K_s$  ( $m^2$ ), est la perméabilité de préforme spécifique et c'est une propriété physique du matériau ;  $K_r$  est perméabilité relative. La perméabilité relative est un scalaire de valeur comprise entre 0 et 1, et elle dépend de la saturation de deux flux. La relation entre la perméabilité relative et la saturation pourrait être décrite par :

$$K_r = A s^B \quad (2-4)$$

Où :  $A$  et  $B$  sont des constants et  $s$  est la saturation qui est égale le rapport du volume de liquide à l'espace de vide initial.

On note que Dopler et al. [21] ont étudié le processus d'infiltration du composite métal-matrice et ont constaté que les résultats numériques ont le meilleur accord avec les résultats expérimentaux lorsque  $A$  et  $B$  égal à 1. HE [22] a considéré que la tension superficielle de l'aluminium fondu empêchera le liquide de remplir tout l'espace vide. Il a établi un modèle de géométrie pour calculer le volume d'air, comme présenté dans la figure 2.10b.

Il a constaté que la fraction d'air est fonction de diamètre moyen particules ( $d_s$ ) est la pression de seuil.

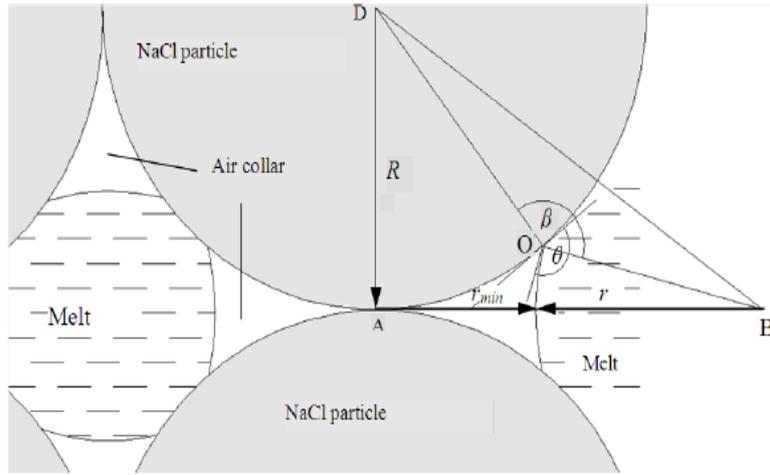
$$V_{air} = \int_0^a \pi (kY^2 + d)^2 dY - \int_0^a \pi [R^2 - (Y - R)^2] dY \quad (2-5)$$

La relation de de Kozeny-Carmen (1937), donne une estimation de la perméabilité  $K_s$  pour un milieu poreux non consolidé constitué d'éléments identiques de géométrie simples [23]:

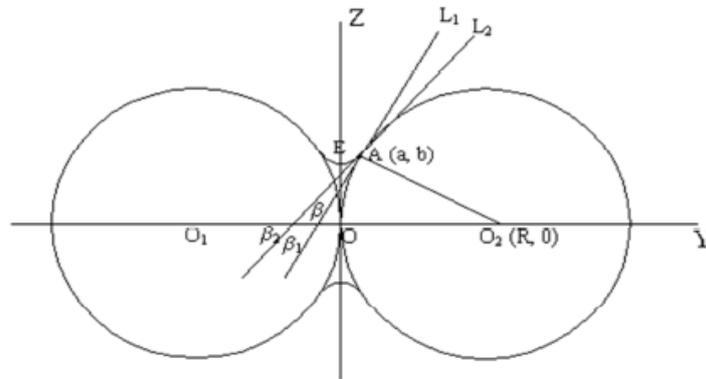
$$K_s = \frac{d_s^2 \varphi^3}{180(1-\varphi)^2} \quad (2-6)$$

Dans ce contexte, Ergun [24], établit une expression semblable à l'équation de Kozney-Carmen en considérant l'écoulement unidirectionnel d'un fluide incompressible au sein d'une colonne poreuse constitué de particules sphériques, de diamètre  $d_p$ , qui est soumise à un gradient de pression :

$$K_s = \frac{d_p^2 \varphi^2}{150(1-\varphi)^2} \quad (2-7)$$



(a)



(b)

**Figure. 2.10 :** (a) Formation de colliers d'air en raison de l'infiltration de métal en fusion dans la couche de NaCl. (b) Modèle géométrique de la distribution de l'air entre deux particules [25].

En conséquence, la saturation pourrait être calculée par l'équation  $s = 1 - \frac{V_{air}}{V_{vide}}$ .

Le gradient de pression être déterminée en fonction la vitesse d'infiltration est illustré à la figure 2.11.

A l'état liquide, l'aluminium a la propriété d'avoir une viscosité dynamique voisine de celle de l'eau. Pour une température de maintien de 680°C, celle-ci vaut en effet 1,286 mPa.s<sup>-1</sup>, contre 1 mPa.s<sup>-1</sup> pour l'eau. Cette propriété est importante, car elle permet, expérimentalement, de prévoir, dans une bonne mesure, le comportement de l'aluminium liquide, à partir de maquettes à eau. A cette température, la masse volumique de l'aluminium est de 2357 kg.m<sup>-3</sup> [1].

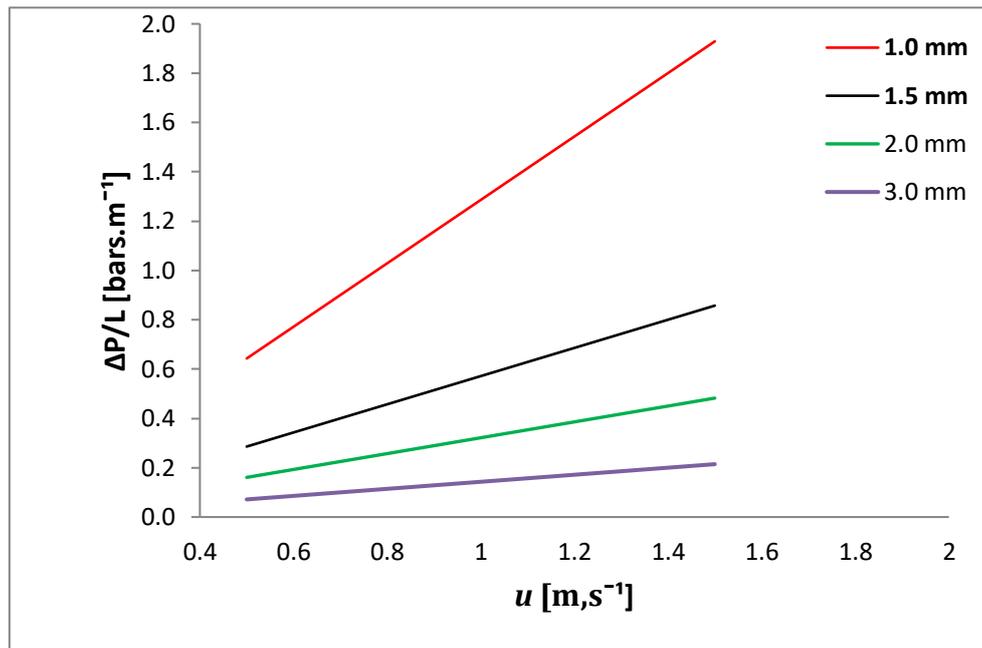


Figure 2.11 : Le gradient de pression en fonction, la vitesse d'infiltration pour différentes tailles des particules et pour perméabilité relative égale 0.8

## 2.4 Causes de formation des défauts

Initialement, le sel gemme ordinaire a été utilisé pour la préforme de cette expérience. Cependant, il a été trouvé pour avoir quelques inconvénients. Elle s'est fissurée à haute température ( $>700^{\circ}C$ ) et, pendant l'infiltration, l'aluminium s'est infiltré dans les fissures et a modifié la structure générale de la mousse. Pour éviter que le sel ne réagisse à l'oxygène, il a fallu le chauffer sous vide. Si cela n'a pas été fait, le sel gemme transformé en une poudre de cendre, probablement en raison de la présence d'impuretés. À la suite de cette eau adoucissant, comprimés ont été utilisés pour surmonter ces problèmes.

Il est important de mentionner que les défauts dans la mousse d'aluminium peuvent se produire dans tout le processus d'infiltration, donc nous devrions analyser chaque étape du processus de fabrication : l'injection, l'infiltration et la solidification.

### (a) Injection

De nombreuses simulations de ce processus ont négligé l'étape d'injection en raison de sa courte durée [26]. Cependant, lorsque l'aluminium liquide à  $680^{\circ}C$  est versé directement sur le dessus de la préforme poreuse à  $630^{\circ}C$ , la température, la vitesse et la viscosité du métal fondu changent radicalement. Par conséquent, l'étude

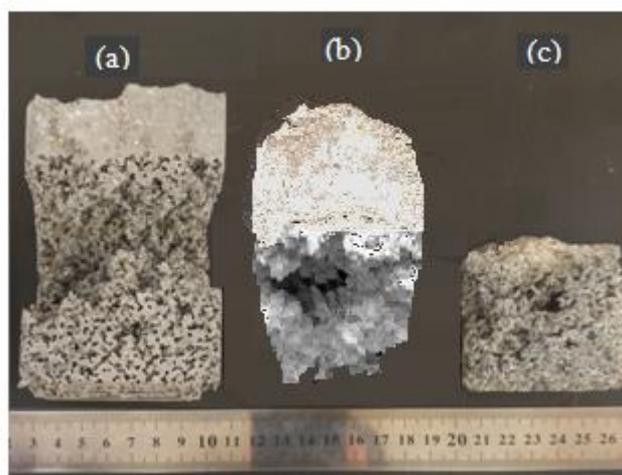
du processus d'injection est importante. Il est évident que la tension superficielle et le phénomène de non-mouillage empêche l'aluminium fondu de remplir l'espace vide par gravité. Une injection de débit faible, le gaz pourrait s'échapper dans l'espace entre les parois du moule et l'aluminium fondu comme il est montré dans la figure 2.12 et devient une pression négative à l'intérieur de la préforme (P1).

En conséquence, la différence de pression entre le haut et le bas de l'aluminium fondu a diminué, ce qui ne favorise pas l'infiltration, mais il peut également y avoir un processus d'infiltration partielle comme il est présenté dans la figure 2.13a. A des débits de gaz élevé, le gaz est injecté au moule comme un jet d'air qui pulvérise l'aluminium fondu dans la préforme. Cela a créé une structure de forme de cône sous laquelle des granules de sel (Fig. 2.13b).

D'autre part, on a constaté d'autres défauts dans les échantillons de mousse d'aluminium, notamment, les bulles qui pouvaient se rester dans l'aluminium fondu au cours de l'étape d'injection. Sous la pression, les bulles pourraient être emprisonnées dans la préforme et deviennent un défaut après la solidification. Les défauts dans la surface et le fond de la mousse d'aluminium sont dus au piégeage de gaz (Fig. 2.13c). Ce dernier phénomène se produit lorsque le volume d'aluminium fondu est insuffisant pour pénétrer dans tout le préforme.



Figure 2.12 ; Principe de l'infiltration par un gaz à faible débit



**Figure 2.13 : (a) Echantillon obtenu après une infiltration partielle - (b) Echantillon obtenu pour un gaz à faible débit- (c) Echantillon obtenu à cause du piégeage de gaz**

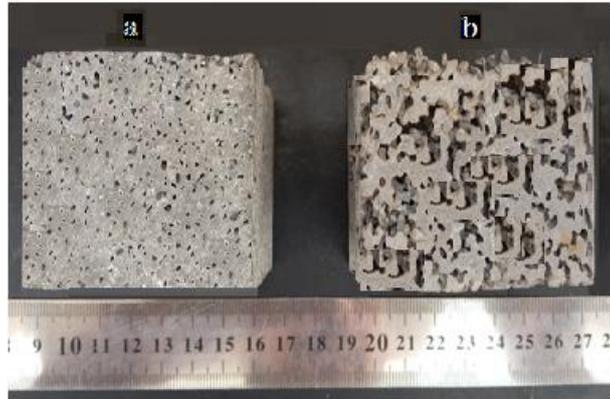
### **(b) Infiltration**

L'étape d'injection et l'étape d'infiltration sont effectuées simultanément. La pression utilisée dans cette étude est de 1-6 bars, et la durée de l'étape d'infiltration est de 2-3 min.

Les échantillons de petite taille de pore nécessitent une pression d'infiltration plus élevée et vice-versa pour les échantillons de grande taille de pores, différents échantillons ont été réalisés sous une pression supérieure et inférieure à 4 bars pour les petits et grands pores et il a été constaté que pour un échantillon de petite taille de pore, une pression de 5 bars et pour un échantillon de grande taille de pore, une pression d'infiltration de 3 bars était suffisante pour fabriquer des échantillons uniformes. Les échantillons, qui ont été fabriqués sous une pression inférieure à la pression de seuil, l'aluminium fondu a été partiellement infiltré et les échantillons fabriqués sous une pression de seuil plus élevée étaient inutilisables, car la préforme était piégée à l'intérieur de la mousse. Par exemple, la Figure. 2.14a montre un échantillon avec une grande taille de pores (2-3 mm) qui a été fabriqué sous une pression d'infiltration de 6 bars. Les pores étaient presque bloqués par l'aluminium et Les particules de chlorure de sodium sont piégées à l'intérieur de l'échantillon et ne peuvent pas être dissoutes.

La figure 2.14b présente une mousse d'aluminium de taille des pores entre (2 à 3 mm) et qui a été fabriquée sous une pression d'infiltration de 2 bars. On peut remarquer

que l'échantillon est mal élaboré, car les pores ne sont pas homogènes, en raison de faible la pression appliquée.



**Figure. 2.14 :** (a) Échantillon élaboré sous une pression de 6 bars- (b) Échantillon élaboré sous une pression de 2 bars

### (c) Solidification

Ce phénomène est difficile à observer par expérience. Le fond du métal fondu est la première partie qui se solidifie, parce que la distance d'écoulement du front d'infiltration est plus grande que les autres parties, ce qui induit une chute de température. En outre, pendant la solidification, la chaleur s'échappe vers l'extérieur par convection à travers les parois du moule. Pour ces raisons, la solidification s'effectue des parois du moule vers la partie centrale du moule. Lorsque la distance d'infiltration est longue et le métal fondu sur la préforme est insuffisant, le défaut se trouve souvent au centre de la partie supérieure de l'échantillon. La figure 2.15 montre que le volume d'aluminium fondu n'est pas suffisant pour toute la préforme et le fond du métal fondu se solidifie premièrement puisque la température de cette partie est plus basse que les autres.



**Figure : 2.15** Défaut de solidification de la mousse d'aluminium

## 2.5 Prévention du défaut

Comme il a été discuté ci-dessus, les défauts de la mousse d'aluminium produite sont causés par les bulles de mélange ou le retrait volumique du métal lors de la solidification. Dans les différentes étapes de fabrication, les types de défauts formés dans la mousse d'aluminium sont divers. Pour les bulles de mélange, elles existent dans les processus d'injection et d'infiltration, et la taille des particules et la pression négative pourraient influencer sur le mouvement des bulles. Alors que le rétrécissement au centre se produit lors de la solidification et qu'il est en relation avec le volume de liquide resté sur le dessus de la préforme. Ainsi, pour réduire le défaut dans les produits, plusieurs méthodes sont proposées dans cette étude pour les différentes procédures.

### (a) Le processus d'injection

Le moyen le plus efficace d'empêcher les bulles d'entrer dans la préforme est de réduire l'étendue de la turbulence pendant le processus d'injection. Pour l'opération de coulée, l'optimisation de la taille ou de la géométrie de l'entrée du moule pourrait améliorer la qualité de la coulée [27].

Au fur et à mesure que la taille de l'entrée du moule augmente, la durée de l'injection diminue et le nombre de bulles piégées dans le liquide réduit. L'autre méthode pour réduire les bulles est d'ajuster l'angle d'injection. Le métal fondu est injecté sur la surface intérieure du moule au lieu de la surface de la préforme et le liquide remplit le moule au long de la paroi. Cette méthode pourrait réduire efficacement l'étendue turbulente de sorte que le nombre de bulles piégées dans le liquide diminue.

Dans le processus d'injection, une certaine pression de seuil est nécessaire pour que l'aluminium fondu pénètre dans la préforme. Une fois la pression atteint une certaine valeur, l'aluminium fondu se remplit la préforme Complètement

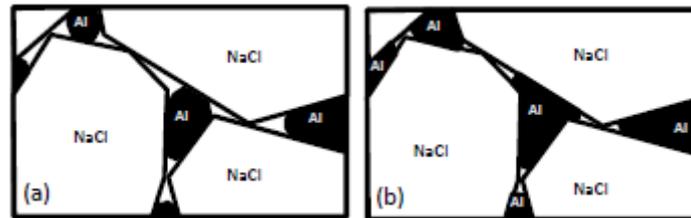
### (b) Le processus d'infiltration

La nature graduelle de l'infiltration a été déterminée par la fraction de la zone poreuse remplie par l'aluminium fondu en fonction de la pression d'infiltration [28]. Cela dépend d'un certain nombre des facteurs, notamment [28]:

- 1- Paramètres capillaires intrinsèques (angle de mouillage et tension superficielle de la fusion métal).
- 2- La taille moyenne des pores.
- 3- Répartition de la taille des pores.

#### 4- Forme des particules de sel.

La figure 2.16 présente des esquisses de l'infiltration progressive entre les particules de sel en contact à des pressions d'infiltration faibles et élevées. En augmentant la pression d'infiltration, les interstices entre les particules de sel se remplissent d'aluminium fondu et réduisent la fenêtre entre les pores et augmentent lorsque la pression chute. En outre, l'augmentation de la pression d'infiltration réduit également la porosité des échantillons.



**Figure 2. 16 : Croquis de l'infiltration progressive entre les particules en contact : (a) à basse pression appliquée, l'aluminium fondu ne pénètre que dans des zones poreuses plus larges ; (b) à haute pression appliquée, le métal pénètre dans des zones étroites entre les particules en contact [28].**

#### **(c) Le processus de solidification**

Le retrait est une sorte de défauts courants dans le processus de coulée traditionnel. En raison de la réduction du volume de liquide, les cavités existent toujours au centre de l'échantillon, là où le liquide se solidifie en dernier lieu. Pour le remède, il était important de garder un volume suffisant de l'aluminium fondu au-dessus de la préforme. Une fois le processus terminé, le moule est laissé à l'intérieur du four, qui a été éteint, pendant dix minutes sous une pression d'un bar. Il était important de garder les vannes fermées pour éviter la diminution de la pression dans le moule, puisque l'aluminium n'était pas complètement solidifié. Et une fois le moule retiré du four, il est placé sur un grand bloc de cuivre. Ces procédures peuvent réduire les défauts de solidification

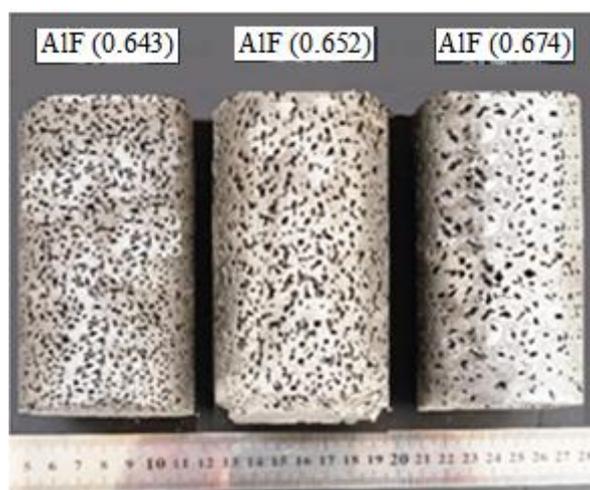
### **2.6 Mousse d'aluminium à cellules ouvertes produite**

Après avoir évité ces défauts dans les processus de production des mousses, des résultats satisfaisants ont été obtenus, comme le montre aux figures. 2.17 et 2.18 qui montrent une surface latérale d'échantillons de mousses d'aluminium à cellules ouvertes préparées avec des particules de NaCl. On constate la bonne répartition des pores du bas vers le haut des échantillons. Cette distribution poreuse homogène est

due à l'infiltration de particules de NaCl dans l'aluminium entièrement fondu sous la pression du gaz argon injecté. La densité plus faible du NaCl solide par rapport à l'aluminium fondu permet une infiltration de bas en haut. On peut voir que ce processus était simple, car il est possible de fabriquer une mousse d'aluminium avec une taille de pores souhaitée. Les particules de NaCl sont systématiquement appliquées pour créer la structure à cellules ouvertes. La taille des pores et la pression d'infiltration étaient les facteurs critiques pour déterminer les caractéristiques de la mousse d'aluminium.



**Figure 2. 17 : Surface latérale des échantillons avec une taille de pores de (1,5–2 mm) obtenue**



**Figure 2. 16 : Trois échantillons des mousses d'aluminium préparées par un moule cylindrique dont la taille des particules de NaCl est de : AIF (0.643) 1-1.5 mm, AIF (0.652) 1.5-2 mm et AIF (0.674) 2-3 mm.**

## 2.12 Conclusion

Le processus de la méthode d'infiltration a été étudié théoriquement et expérimentalement pour la préparation du mousse d'aluminium. Les causes des défauts dans la mousse d'aluminium à cellules ouvertes ont été présentées. On a constaté que les bulles peuvent se mélanger et restent dans le liquide au cours de l'étape d'injection.

Les défauts à la surface et à l'intérieur de la mousse d'aluminium sont dus au piégeage de gaz. Les bulles pourraient être emprisonnées dans la préforme et deviennent un défaut après la solidification. Ce dernier phénomène se produit lorsque le volume d'aluminium fondu est insuffisant pour l'infiltration.

Dans le cas d'injection à débit faible, le gaz pourrait s'échapper dans l'espace entre les parois du moule et l'aluminium fondu et devient une pression négative à l'intérieur de la préforme, ce qui conduit à la diminution de la différence de pression entre le haut et le bas de l'aluminium fondu ce qui empêche le remplissage du vide.

Dans l'étape d'infiltration, si la pression à l'intérieur du moule est trop élevée, au cours du processus d'infiltration, l'aluminium fondu encercle les particules de sel et empêche le sel de filtrer complètement à l'extérieur de l'échantillon et les particules ne peuvent pas être dissoutes par lessivage. Si la pression d'infiltration est insuffisante, la mousse fabriquée est incohérente et non homogène.

Dans l'étape de solidification, lorsque l'aluminium fondu ne reste pas au-dessus de la préforme, le défaut se trouve souvent au centre de la partie supérieure de l'échantillon. Cette partie est la zone finale qui se solidifie.

Pour éviter les défauts qui sont apparus dans les échantillons produits et améliorer leur qualité, chaque étape de la production a été analysée séparément:

- Pour l'étape d'injection, le réglage de débit de gaz et l'ajustement de l'angle d'injection pourrait empêcher le remplissage du vide et réduire l'étendue turbulente et réduire le nombre de bulles emprisonnées dans l'aluminium fondu.

- Dans l'étape d'infiltration une certaine pression de seuil est nécessaire pour que l'aluminium fondu pénètre dans la préforme. Le réglage d'une idéale pression est vital pour la fabrication des bons échantillons car il définit la proximité des pores dans la mousse.

Le mouvement des bulles est affecté par la taille des particules et la pression négative pendant le processus d'infiltration. La petite particule et la faible pression

négative pourraient conduire à une faible vitesse d'infiltration, qui pourrait réduire les bulles restées dans la zone poreuse.

- Dans l'étape de solidification, il était important de garder un volume suffisant de l'aluminium fondu au-dessus de la préforme. Une fois le processus terminé, le moule est laissé à l'intérieur du four, qui a été éteint, pendant dix minutes sous une pression d'un bar. Il était important de garder les vannes fermées pour éviter la diminution de la pression dans le moule, puisque l'aluminium n'était pas complètement solidifié. Et une fois le moule retiré du four, il est placé sur un grand bloc de cuivre. Ces procédures peuvent réduire les défauts de solidification.

Après avoir évité ces défauts dans les processus de production des mousses, des résultats satisfaisants ont été obtenus

## Références :

- [1] O. Mirgaux, Modélisation de la purification de l'aluminium liquide par procédé de flottation en cuve agitée, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
- [2] Y. Conde, JF. Despois, R. Goodall, A. Marmottant, L. Salvo, C. San Marchi, and A. Mortensen, Replication Processing of Highly Porous Materials, *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 9, 2006, 795–803.
- [3] D. D. Ebbing, and S. D. Gammon, *General Chemistry*, Houghton Mifflin Company, 2009, USA.
- [4] R. Goodall, JF. Despois, A. Marmottant, L. Salvo, and A. Mortensen, The effect of preform processing on replicated aluminum foam structure and mechanical properties, *Scr. Mater.*, Vol. 54, No. 12, 2006, 2069–2073.
- [5] J. Banhart, MF. Ashby, and NA. Fleck, Properties and applications of cast aluminum sponges, *Met. Foam Porous Met. Struct.*, 1999, 159–162.
- [6] Q. Fabrizio, A. Boschetto, L. Rovatti, and L. Santo, Replication casting of open-cell AlSi7Mg0.3 foams, *Mater. Lett.*, Vol. 65, No. (17-18), 2011, 2558–2561.
- [7] R. Jamshidi-Alashti, and G. Roudini, Producing replicated open-cell aluminum foams by a novel method of melt squeezing procedure, *Mater. Lett.*, Vol. 76, 2012, 233–236.
- [8] A. Mortensen, T. Wong, Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: Part III. capillary phenomena, *Metallurgical Transactions A*, 21, 1990, 2257-2263.
- [9] A. Mortensen, L.J. Masur, J.A. Cornie, M.C. Flemings, Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: Part I. Theory, *Metallurgical Transactions A*, 20, 1989, 2535-2547.
- [10] L.J. Masur, A. Mortensen, J.A. Cornie, M.C. Flemings, Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: Part II. Experiment, *Metallurgical Transactions A*, 20, 1989, 2549-2557.
- [11] JM. Molina, RA. Saravanan, R. Arpon, C. Garcia-Cordovilla, E. Louis, J. Narciso, *Acta. Mater.*, 2002, 50:247.
- [12] C. Garcia-Cordovilla, E. Louis, and J. Narciso, *Acta. Mater.*, 1999, 47:4461.
- [13] A. Mortensen, and I. Jin, *Int. Mater. Rev.*, 1992, 37:101.
- [14] J. Bear, *Dynamics of fluids in porous media*, New York, NY: Dover Publications, 1988.
- [15] A. Alonso, A. Pamies, J. Narciso, C. Garcia-Cordovilla, and E. Louis, *Metall Mater. Trans. A* 1993;24:1423.
- [16] R. Raja, and S. Yogeshwar, Interfacial Tension between Aluminum Alloy and Molten Salt Flux, *Materials Transactions JIM*, Vol. 38, No. 6, 1997, 546-552. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans1989.38.546>
- [17] J. Goicoechea, C. Garcia-Cordovilla, E. Louis, and A. Pamies, Surface tension of binary and ternary aluminum alloys of the systems Al-Si-Mg and Al-Zn-Mg, *Journal of Materials Science*, Vol. 27, 1992 5247-5252.
- [18] K. Berchem, U. Mohr, and W. Bleck, Controlling the degree of pore opening of metal sponges, prepared by the infiltration preparation method, *Materials Science and Engineering: A*, 323, 2002, 52-57.
- [19] J. Wannasin, and M.C.Flemings, Threshold pressure for infiltration of ceramic compacts containing fine powders, *Scripta Materialia*, Vol. 53, No. 6, 2005, 657–661. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.05.021>

- [20] J.M. Molina, E. Piñero, J. Narciso, C. García-Cordovilla, and E. Louis, Liquid metal infiltration into ceramic particle preforms with bimodal size distributions, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 9, 2005, 202-210.
- [21] T. Dopler, A. Modaressi, V. Michaud, Simulation of metal-matrix composite isothermal infiltration processing, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, Vol 31 (2000) 225-234.
- [22] S.Y. He, Metallic foam and metal porous polymer composite (MPPC): manufacture and mechanical behavior, in: LASMIS, UTT, France, 2004.
- [23] ED. Krauss, and C. DC. Mays, Modification of the Koszeny-Carman Equation to quantify formation damage by fines in clean unconsolidated porous media, *SPE Res. Eval. and Eng.* Vol.17, No. 04, 2014, 466–472. <https://doi.org/10.2118/165148-PA>. [CrossRef]
- [24] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, *Chemical engineering progress*, Vol. 48, 1952, 89-94
- [25] K. Berchem, U. Mohr, and W. Bleck, Controlling the degree of pore opening of metal sponges, prepared by the infiltration preparation method, *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, Vol. 323, 2002, 52-57.
- [26] H. Chattopadhyay, Simulation of transport processes in squeeze casting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, 2007, 174-178.
- [27] Z. Sun, H. Hu, X. Chen, Q. Wang, and W. Yang, Gating system design for a magnesium alloy casting, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 24, 2008, 93-95.
- [28] JF. Despois, A. Marmottant, L. Salvo, and A. Mortensen, Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminum foams, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 462, No. 1-2, 2007, 68–75.

**Chapitre 3**  
**Paramètres Structuraux et Propriétés Mécaniques**  
**de la Mousse d'Aluminium à Cellules Ouvertes**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre les paramètres structuraux, les propriétés mécaniques des mousses d'aluminium à cellules ouvertes de porosité modérée obtenues ont été déterminés.

### 3.2 Paramètres structurels

La détermination de la taille moyenne des pores et de la densité des pores est toujours un problème pour les mousses métalliques, car la mousse métallique est une structure complexe. Il est difficile de créer un motif géométrique à partir de mousse métallique. Les paramètres structurels des mousses d'aluminium à cellules ouvertes fabriquées par la technique d'infiltration sont affectés par la disposition et la forme des particules de préforme. La structure des pores est simplifiée en une forme de tétrakaïdecaèdre (Fig. 3.1b) composée de 8 hexagones réguliers et de 6 carrés, ce qui est considéré comme plus proche de la forme réelle [1]. La forme des cellules de mousse polyédriques obtenues a été considérée comme les cellules de Kelvin [2]. En fonction de cette cellule unitaire typique, différents modèles ont été proposés pour déterminer les paramètres des mousses métalliques à cellules ouvertes. L'un d'eux est le modèle proposé par Calmidi [3] pour estimer le diamètre de fibre en fonction du diamètre des pores et de la porosité (Eq. 1.5).

On note que les performances de la mousse métallique sont liées à la porosité, à la densité des pores, à la surface spécifique, à la densité et à la structure. Dans cette partie de cette étude, les paramètres structuraux des échantillons obtenus [AlF (0.643), AlF (0.652), AlF (0.674)] ont été déterminés, qui avaient des tailles de pores de (1-1,5 mm), (1,5-2,0 mm) et (2,0-3,0 mm) respectivement (Fig. 3.1a).

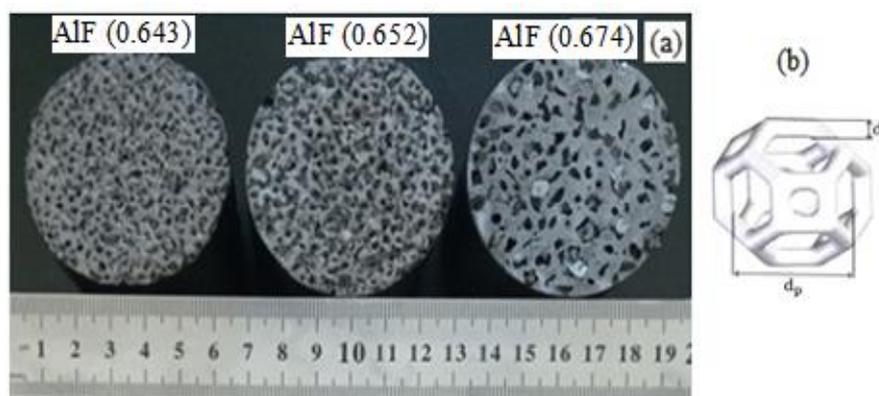


Figure 3.1 : (a) Echantillons des mousses d'aluminium à cellules ouvertes avec différentes tailles de pores ; (b) Cellule de Kelvin (cellule unitaire de tétrakaïdecaèdre) [2].

### 3.2.1 Diamètre de pore

Il est très difficile de mesurer le diamètre de pores pour des mousses à cellule ouverte à partir d'images de MEB. Les relations structurelles de préforme (grain de sel) qui est considéré comme la forme intérieure de la mousse permettant notamment de relier le diamètre de pores par le diamètre moyen des particules de sel qui peut être utilisé comme longueur caractéristique.

### 3.2.2 Densité

La densité réelle de la mousse a été mesurée de façons pesant l'échantillon de volume connu (c'est-à-dire en mesurant la masse volumique de la mousse et en la normalisant à celle de l'eau)

### 3.2.3 Porosité

Pour calculer la porosité des échantillons, on a d'abord mesuré le poids et le volume de l'échantillon. Ensuite, le poids d'une barre en aluminium solide similaire à l'échantillon (même volume) a été calculé en connaissant la densité en aluminium pur (2,7 g/cm<sup>3</sup> fournie par le fournisseur). Maintenant la porosité peut être calculée en soustrayant ces deux valeurs et en calculant le pourcentage de l'espace vide à l'intérieur de l'échantillon.

### 3.2.4 La surface spécifique

La surface spécifique des mousses d'aluminium a été obtenue en supposant que toutes les particules de sel étaient des sphères. L'équation (1.3) a été utilisée pour obtenir la surface spécifique.

### 3.2.5 Perméabilité

Calmidi [3] a proposé une équation pour calculer  $K$  en fonction de la porosité, du diamètre des pores et du diamètre des fibres de la mousse :

$$\frac{K}{d_p^2} = 0.00073(1 - \varphi)^{-0.224}(d_f/d_p)^{-1.11} \quad (3-1)$$

### 3.2.6 Tortuosité

L'équation (1.8) a été utilisée pour obtenir la tortuosité :

Le tableau 3.1 regroupe les paramètres structuraux des mousses obtenus. Certains paramètres sont mesurés expérimentaux et d'autres sont calculés. On peut remarque que plus le diamètre de pore augmente, plus le diamètre de fibre, la porosité, la perméabilité et la tortuosité augmentent, tandis que la densité, la surface spécifique et PPI diminuent. D'après ce tableau, la valeur maximale de porosité est de 0,674 lorsque la valeur de densité est de 0,89 g/cm<sup>3</sup> et le diamètre des pores d'environ 2,5 mm. Ces résultats sont proches de ceux d'Erardo et al. [4] qui ont étudié les procédures de moulage pour la production de mousse d'aluminium à cellules ouvertes par la même technique d'infiltration, et ils ont obtenu une porosité comprise entre 0,61 et 0,77, avec une taille de pore de 1 à 2,36 mm

Le tableau 3.1 regroupe les caractéristiques des mousses obtenus. Certaines données sont mesurées, expérimentale et d'autres déduites ou calculées.

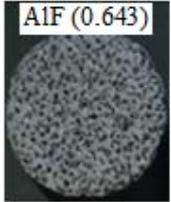
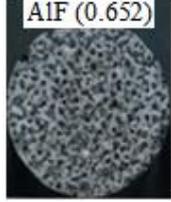
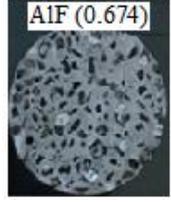
Mousse Al	$d_p$ (mm) valeur calculée	$d_f$ (mm) valeur calculée	$\varphi$ valeur expérimentale	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) valeur expérimentale	$S_p$ (m <sup>-1</sup> ) valeur calculée	K (m <sup>2</sup> ) Valeur calculée	$\tau$ valeur calculée	PPI valeur expérimentale
AIF (0.643)	1.3	0.3	0.643	0.97	1674	7,9E-09	1,8	<b>PPI 10</b> AIF (0.643) 
AIF (0.652)	1.7	0.4	0.652	0.94	1228	1,3E-08	1,81	<b>PPI 15</b> AIF (0.652) 
AIF (0.674)	2.5	0.55	0.674	0.89	782	3,1E-08	1,83	<b>PPI 20</b> AIF (0.674) 

Table 3.1 : Caractérisation des différents échantillons élaborés.

### 3.3 Propriétés mécaniques de mousses en compression

Dans cette partie, nous présentons brièvement les concepts et résultats principaux concernant la mécanique des mousses.

#### 3.3.1 Principe

La performance mécanique des mousses métalliques dépend également de leur densité relative, de leur topologie cellulaire, de leur taille et de leur forme [5]. La densité relative, selon Pinto et al. [6], est le facteur le plus important pour déterminer le comportement mécanique et la résistance d'une mousse métallique. Par exemple, une mousse plus dense a un module et une limite d'élasticité plus élevés [7-9]; cependant, la densité et la taille moyenne des cellules ne sont pas indépendantes. Une taille moyenne des cellules plus élevée conduit à des densités plus faibles, mais sous certaines limites, entraînent une rupture de la paroi cellulaire [9]. Par exemple, les effets de la taille et de la forme des cellules ont été étudiés par Nieh et al. [8], et des essais de compression quasi-statique ont été effectués par Kang et al. [10], qui ont évalués les propriétés mécaniques et caractéristiques de déformation des mousses d'aluminium à cellules ouvertes. Ces derniers ont démontré que le comportement mécanique des mousses est peu sensible à la vitesse de déformation et les mousses à cellules ouvertes présentaient une déformation plastique homogène.

L'essai de compression sur une mousse d'aluminium est l'essai le plus simple à réaliser et donc le plus répandu et étudié. Toutefois, comme il n'est pas uniforme actuellement, un certain nombre de précautions doivent être prises pour obtenir des résultats plus reproductibles et comparables entre eux. En effet, il existe de multiples paramètres qui peuvent influencer sur la forme de courbe effort / déplacement ou contrainte / déformation.

Le comportement de compression des mousses d'aluminium a été étudié en profondeur en raison de leur capacité de dissipation d'énergie. En tension, les mousses d'aluminium présentent généralement un comportement fragile. La charge de traction est également importante dans la pratique, car les structures peuvent être soumises à la flexion et le comportement de traction fragile qui en résulte une absorption d'énergie.

Des essais de compression sur plusieurs échantillons de différentes tailles de pores, permis de tracer la courbe contrainte (en MPa) en fonction de la déformation. Ceci conduits à interpréter les courbes des essais de compressions qui présentent une allure

qui comporte trois domaines. Marchic et Mortensen [11] analysèrent la relation entre la contrainte relative et la densité relative. La méthode d'essai la plus courante pour les mousses d'aluminium est l'essai de compression uniaxiale. Les courbes de contrainte-déformation obtenues à partir des essais se composent de trois parties : 1- région quasi-élastique, 2- région plateau et 3- région de densification. La région quasi-élastique est définie à la production de la couche poreuse la plus faible, généralement appelée contrainte d'effondrement. La région du plateau est caractérisée par une grande efficacité d'absorption d'énergie, où presque toute la déformation, l'énergie est absorbée à un niveau de force constant. La région de densification est caractérisée par une augmentation rapide de la force à une déformation presque constante. Cependant, les régions sur les courbes de contrainte-déformation sont différentes en raison de la variabilité de la densité, des défauts structurels, de la porosité, etc.

- la contrainte de déformation  $\sigma$  a été calculée à partir de la force  $F$  à l'aide d'une coupe transversale apparente de surface  $S$  du spécimen :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3-2)$$

- la déformation  $\varepsilon$  a été calculée à partir sa hauteur  $h$  sous compression est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3-3)$$

### 3.3 Étude expérimentale des propriétés mécaniques

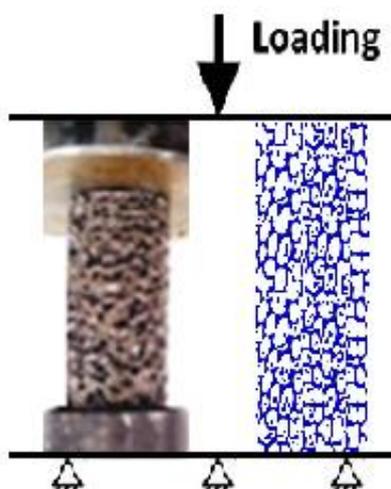
La configuration expérimentale utilisée dans le cadre de cette étude est illustrée à la fig. 3.2. Les deux faces planes de chaque matériau cylindrique sont usinées afin de garantir que les deux sections des cylindres sont rigoureusement parallèles. Les matériaux présentent un diamètre  $d_0 = 30$  mm et une hauteur initiale  $h_0 = 60$  mm.

Les échantillons peuvent ensuite être comprimés en imposant un déplacement à l'aide d'un moteur pas à pas. La vitesse de déformation est contrôlée et a été fixée à  $0.001 \text{ s}^{-1}$  entre deux supports, l'un étant mobile et l'autre statique. Pour chaque test, une précontrainte de 0.1 KN est appliquée afin de s'assurer que l'échantillon est en contact plan avec les deux mâchoires qui servent à appliquer la déformation. Le capteur de force, de valeur maximale de 100 KN, mesure la résistance du matériau sous le déplacement mécanique du support.

L'ensemble de cette technique expérimentale va nous permettre de caractériser les matériaux après chaque étape de fabrication et de faire le lien entre les propriétés des échantillons, la structure des mousses obtenues et leurs propriétés mécaniques.

Connaissant la surface de contact  $S_0$  (section initiale du cylindre avant compression), la contrainte  $\sigma$  est déduite de la force selon l'équation (3.4). Dans le cadre des mesures effectuées dans ce travail, nous considérerons  $S_0$  comme invariant au cours de la compression. La déformation est définie de la manière selon l'équation (3.4). Chaque échantillon a été testé trois fois au total pour des tests de compression mécanique.

Le comportement stress-déformation des trois échantillons soumis à la compression est illustré à la figure 3.3.



**Figure 3. 2 : Essai de compression mécanique uniaxiale sur un échantillon cylindrique de longueur deux fois son diamètre**

### **3.3.1 Propriétés mécaniques**

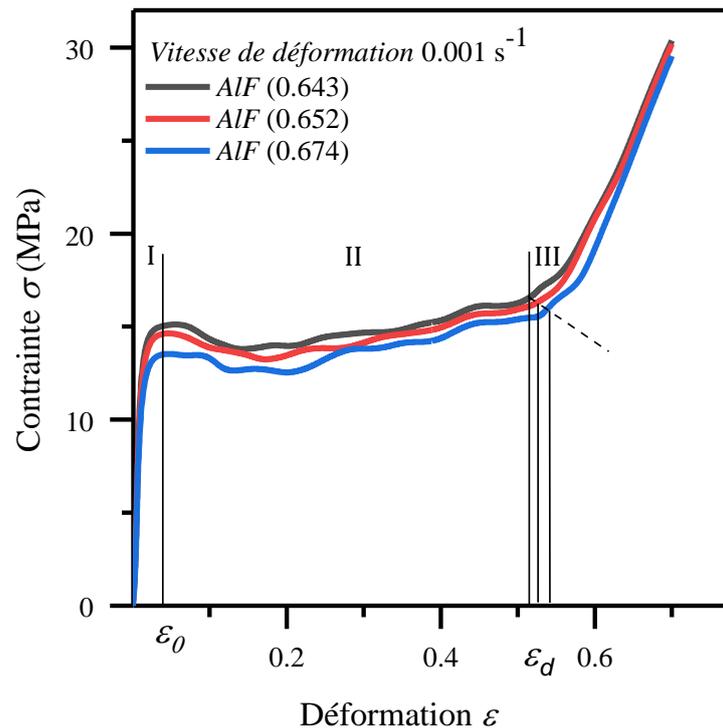
Les courbes  $\sigma - \varepsilon$  sont présentées dans la figure 3.3 qui montre les courbes de charge de compression sur les mousses d'aluminium et de différentes porosités (0.643, 0.652 et 0.674) et densités de pores (10, 15, 20 PPI). Comme l'illustrent les courbes contrainte-déformation, lorsque la mousse est chargée en compression, la plastification se produit à environ 0.05 de déformation suivie d'un long plateau de densification jusqu'à environ 0.5 de déformation. Au cours de cette phase de densification, la mousse subit de fortes déformations sans augmentation substantielle des contraintes. A environ 0.5 de déformation, l'effondrement des

ligaments de la mousse est complet et les vides qui étaient initialement présents dans le matériau n'existent plus. Une fois la densification terminée, la relation contrainte-déformation montre une augmentation drastique de la rigidité à mesure que la mousse prend les propriétés élastiques de la base matérielle. C'est-à-dire que la pente de la courbe contrainte-déformation de la mousse après densification est égale au module d'élasticité de l'aluminium.

La courbe de compression d'une mousse d'aluminium a été décomposée en trois phases: élastique, plateau plastique et densification. Ces trois phases ont été à différents modes de déformations des arêtes et des parois et donc au comportement mécanique des matériaux de base. Le comportement des mousses d'aluminium en compression dans la zone élastique peut être décrit par le choix classique de module de Young  $E$ , est dû à un régime de réarrangement au début de l'essai de compression.

La deuxième étape, le plateau plastique, Lorsque la contrainte dépasse un certain seuil, les cellules de la mousse s'effondrent plastiquement, ce qui résulte un long plateau quasi horizontal sur la courbe contrainte / déplacement d'où la déformation n'est plus recouvrable. La troisième étape, une déformation plastique importante en compression produit une densification des cellules effondrées, ce qui conduit à une augmentation de la contrainte qui tend alors vers l'infini pour un certain niveau de déformation  $\varepsilon_d$ . La densification du matériau sera totale lorsque le volume global du matériau après compression sera égal au volume de solide [107]. De plus, l'influence de la structure de la mousse d'aluminium a un effet sur le comportement mécanique du matériau, c'est-à-dire que les courbes des trois échantillons sont différentes. Il a été signalé que le comportement mécanique des matériaux de mousse est complexe et dépend principalement de trois facteurs, à savoir la porosité, la densité et la microstructure [108]. Selon le tableau 3.2, les mousses d'aluminium de plus haute densité (0,97 g/cm<sup>3</sup>) et de plus faible porosité (0,643) a le module d'élasticité le plus élevé (0.55 GPa) et la contrainte plateau  $\sigma_p$  (16.66 MPa). Le phénomène de solidification se produit sur la courbe contrainte/déplacement avec une porosité plus faible se produit à la phase plateau, conduisant à une augmentation significative du plateau. Les courbes contrainte-déformation pour les mousses de porosités différentes ont montré que la limite d'élasticité des échantillons varie comme le montre la figure 3.3. Il a été trouvé que le facteur le plus important de la résistance à la compression des mousses est sa porosité ou sa densité relative [10]. La ligne discontinue illustrée à la figure 3.3 montre que la déformation de densification des mousses d'aluminium à

cellules ouvertes diminue généralement avec la diminution de la porosité. Ceci est principalement dû à l'augmentation du ratio volumique de la phase solide, ce qui produit l'étape de densification plus précoce lors de l'essai de compression uniaxiale. Avec l'effondrement cellulaire de mousse continu, la matrice commence à s'empiler de manière dense les unes sur les autres, jusqu'à ce que les cellules soient complètement comprimées et que la courbe de compression atteigne l'étape de densification.



**Figure 3.3 : Courbe contrainte / déformation caractéristique des mousses d'aluminium obtenues avec différentes porosités.**

D'autre part, les figures 3.4 et 3.5 montrent l'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des échantillons, et le tableau 3.2 donne un aperçu de ses propriétés. Le module d'élasticité en fonction de la porosité  $\varphi$  est présenté sur la figure 3.4, où E est déterminé en utilisant une technique de régression linéaire standard dans la première partie de l'étape linéaire élastique. La figure 3.5 montre la courbe de contrainte plateau - porosité ( $\sigma_p - \varphi$ ) des échantillons de la mousse à cellules ouvertes, dans laquelle la contrainte plateau  $\sigma_p$  a été obtenue comme suit [12]:

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_0} \quad (3-4)$$

Il est clair que grâce aux essais de compression, les propriétés mécaniques et les comportements de la mousse peuvent être considérablement améliorés en abaissant la porosité.

Basé sur le modèle de Gibson et al. [13] et Ashby et al. [14], des courbes d'ajustement ont été proposées pour le module d'élasticité, la contrainte plateau et la capacité d'absorption d'énergie des échantillons.

Eprouvette Mousse Al	E (GPa)	$\sigma_p$ (MPa)
AIF(0.643)	0.55	16.66
AIF(0.652)	0.51	16.38
AIF(0.674)	0.45	15.83

Tableau 3. 2: Paramètres mécaniques des mousses d'aluminium avec différentes porosités  $\varphi$ .

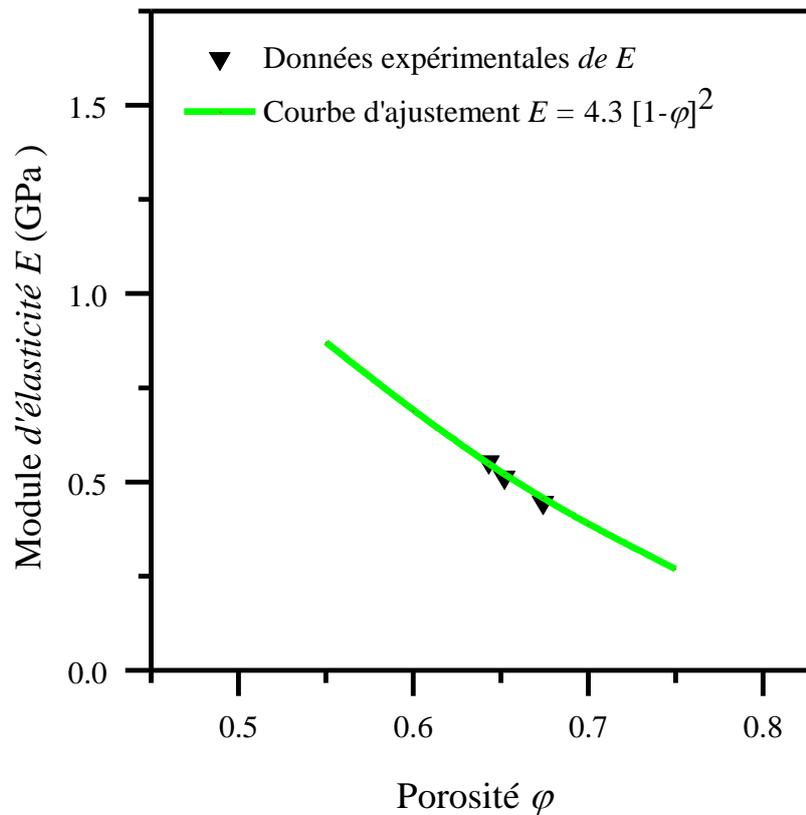


Figure 3.4 : Influence de la porosité  $\varphi$  sur le module d'élasticité  $E$

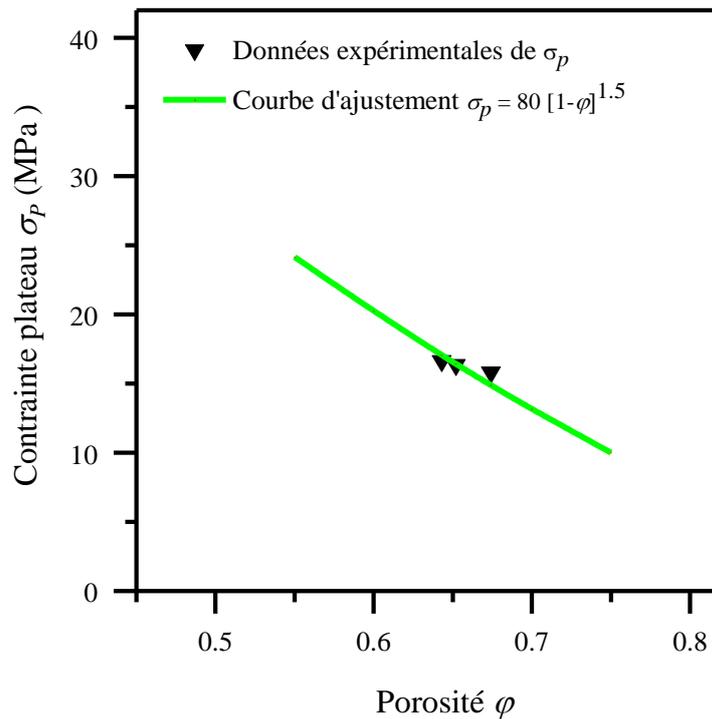


Figure 3.5 : Influence de la porosité  $\phi$  sur la contrainte plateau  $\sigma_p$ .

### 3.3.2 Capacité d'absorption d'énergie par unité de volume

Comme le montre dans la figure 3.3, les mousses d'aluminium à cellules ouvertes montrent de nombreux gains d'absorption d'énergie pour le long plateau de contrainte sous compression pendant la phase de déformation plastique résultant de l'effondrement progressif des cellules, permettant d'énormes déformations lorsque la contrainte augmente progressivement. La zone sous la courbe de contrainte jusqu'à une déformation particulière représente l'absorption d'énergie par unité de volume  $W_v$ , où la zone sous la courbe est calculée par intégration [15] :

$$W_v = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3-5)$$

L'énergie absorbée à une déformation allant de 0 à la déformation de densification  $\varepsilon_d$  définit en général l'énergie de déformation de densification  $W_{vd}$ .

La figure 3.6 montre les courbes: énergie de déformation de densification-déformation ( $W_{vd}-\varepsilon$ ) des mousses d'aluminium à cellules ouvertes avec les porosités  $\phi$  (0, 643, 0, 652 et 0, 674) avant l'étape de densification. Il est évident que la mousse d'aluminium à cellules ouvertes à faible porosité a une plus grande capacité

d'absorption d'énergie, ce qui correspond à la variation de la contrainte plateau avec la porosité (Fig. 3.5). La capacité d'absorption d'énergie des mousses d'aluminium est principalement due au rendement des cellules, au frottement entre les parois cellulaires, au flambage et à la rupture [16, 17]. Les mousses à porosité plus faible ont un rendement et une résistance à la rupture plus élevés que celles à porosité plus élevée [17]. De plus, ils incluent un rapport plus élevé de matrice solide, ce qui entraîne la libération de plus d'énergie de friction lors de la dégradation des cellules. Ainsi, la mousse d'aluminium à faible porosité a une plus grande capacité à absorber l'énergie que les mousses à porosité plus élevée.

La relation entre  $W_{vd}$  et  $\varphi$  est illustrée à la figure 3.7, à mesure que la porosité augmente, l'énergie de déformation de densification diminue. Bien que la déformation de densification dans la mousse à faible porosité soit plus faible, la contrainte plateau plus élevée donne à l'énergie de déformation de densification une valeur plus élevée. De plus, l'effet de la porosité est cohérent avec l'effet de la densité relative sur l'énergie de déformation de densification. La figure 3.8 montre comment la densité relative des mousses d'aluminium à cellules ouvertes affecte sur l'énergie de déformation de densification. Alors que la déformation de densification diminue à mesure que la densité relative augmente (c'est-à-dire que la porosité diminue), l'énergie de déformation de densification augmente de manière significative avec la densité relative, principalement en raison de l'augmentation de la contrainte plateau. Par conséquent, la densité relative élevée de la mousse d'aluminium à cellules ouvertes doit être utilisée lorsqu'une quantité importante d'énergie doit être absorbée. Bien que les mousses d'aluminium à cellules ouvertes à faible porosité présentent un module élastique et une contrainte plateau plus élevés, cela ne signifie pas pour autant une plus grande capacité à absorber l'énergie. La capacité d'absorption d'énergie est généralement utilisée pour décrire l'absorption d'énergie même la déformation de densification. Il est vague d'identifier la déformation de densification avec la diminution de la porosité, afin d'éviter le facteur de déformation de densification, il est donc plus raisonnable d'évaluer la capacité d'absorption d'énergie en fonction de la contrainte [18]. La quantité de contrainte qui est transmise à l'élément protégé doit être inférieure à une certaine limite. C'est-à-dire que même si l'énergie absorbée était suffisamment, la protection serait inutile si le composant protégé était endommagé. Par conséquent, pour les applications impliquant une protection, il est préférable d'estimer la capacité d'absorption d'énergie accompagnant la même contrainte dans

tous les échantillons. La figure 3.9 donne les courbes d'absorption d'énergie-contrainte ( $W_v$ - $\sigma$ ) des trois échantillons. On observe que les courbes se croisent lorsque la contrainte passe de 16,25 MPa à 17.7 MPa, et trois divisions sont visibles à l'aide de ces intersections. Dans le cas où  $\sigma < 16.25$  MPa, la mousse d'aluminium à cellules ouvertes à haute porosité présente la meilleure capacité d'absorption d'énergie. Lorsque  $16.25 \text{ MPa} < \sigma < 17.7 \text{ MPa}$ , les mousses d'aluminium avec une porosité de 0,653 présentent la meilleure capacité d'absorption d'énergie. Alors que  $\sigma > 17.7 \text{ MPa}$ , la mousse d'aluminium à cellules ouvertes à faible porosité démontre la meilleure capacité d'absorption d'énergie.

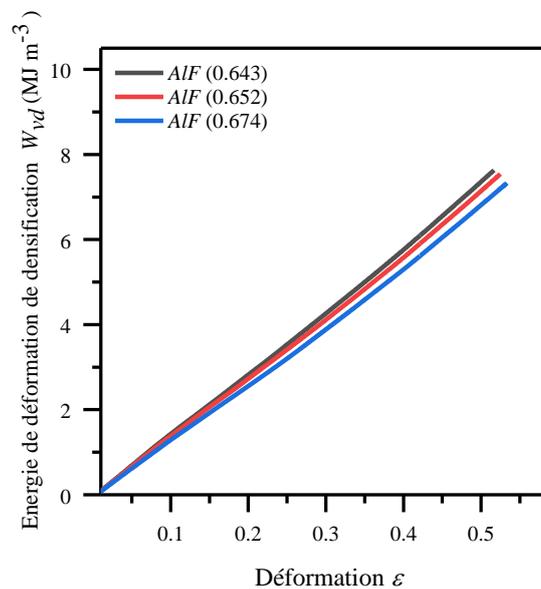


Figure 3.6 : Energie de déformation de densification vs. déformation.

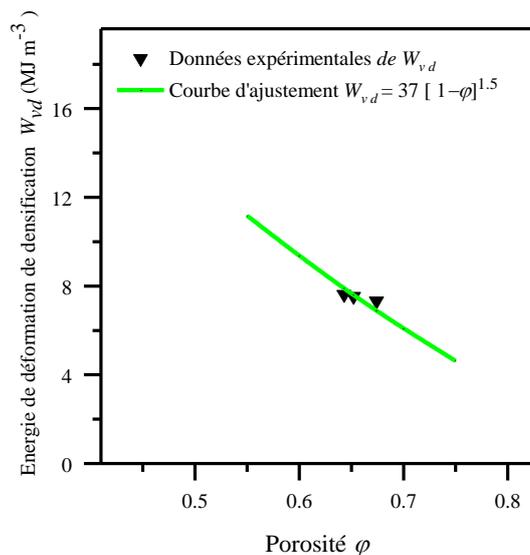


Figure 3.7 : Energie de déformation de densification vs. porosité.

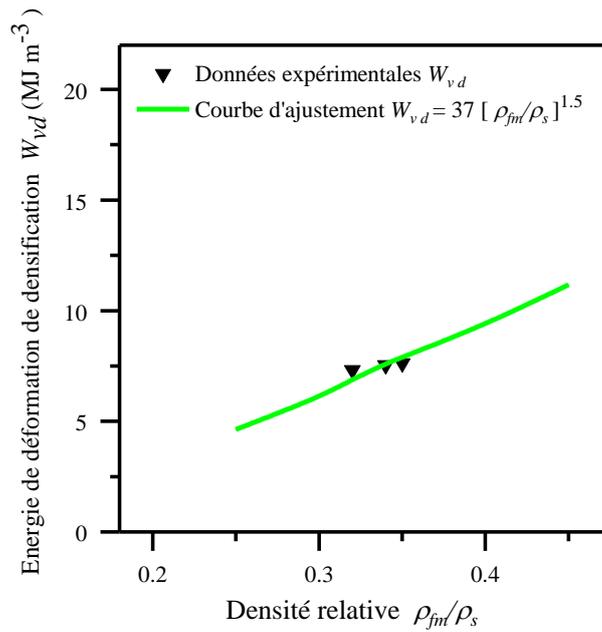


Figure. 3.8 : Énergie de déformation de densification vs. relative densité.

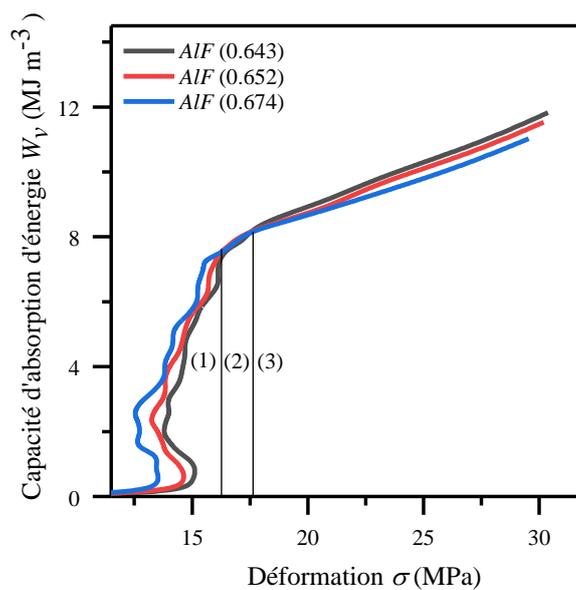


Figure. 3.9 : Capacité d'absorption d'énergie vs. contrainte

### 3.3.2.1 Efficacité d'absorption d'énergie

L'efficacité d'absorption d'énergie  $\eta$  est utilisée pour déterminer la condition optimale d'absorption d'énergie des mousses d'aluminium à cellules ouvertes, où peut être calculée comme suit [19] :

$$\eta = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (3-6)$$

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (3-7)$$

La relation entre l'efficacité d'absorption d'énergie  $\eta$  et la déformation des échantillons est présentée sur la figure 3.10. On découvre que la phase ascendante, la phase stable et la phase décroissante sont les trois phases des courbes. En phase d'ascension, dans une large plage de déformation, l'efficacité d'absorption d'énergie augmente rapidement. Ensuite, il entre dans une phase de rétrécissement, qui correspond à la fin de la phase de plateau de la courbe contrainte-déformation. Par la suite, l'efficacité d'absorption d'énergie diminue régulièrement sur le reste de la plage de déformation. L'efficacité d'absorption d'énergie de ces échantillons était inférieure à 0,5. Lorsqu'une matrice en aluminium pur est utilisée, l'efficacité d'absorption d'énergie est souvent inférieure à 0,7 [20].

La figure 3.11 montre les courbes  $\eta$ - $\sigma$  pour les trois échantillons. Où ils montrent que l'efficacité maximale d'adsorption d'énergie correspond à la valeur de contrainte plateau  $\sigma_p$  pour chaque échantillon. Alors qu'il diminue à mesure que la porosité augmente en raison de la faible contrainte générée par les échantillons à forte porosité lors des tests de compression.

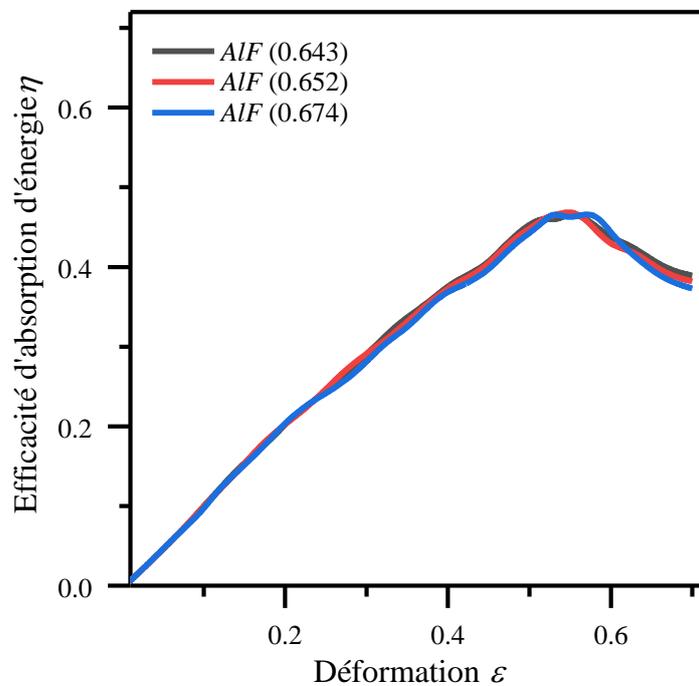


Figure. 3.10 : L'efficacité d'absorption d'énergie vs. déformation.

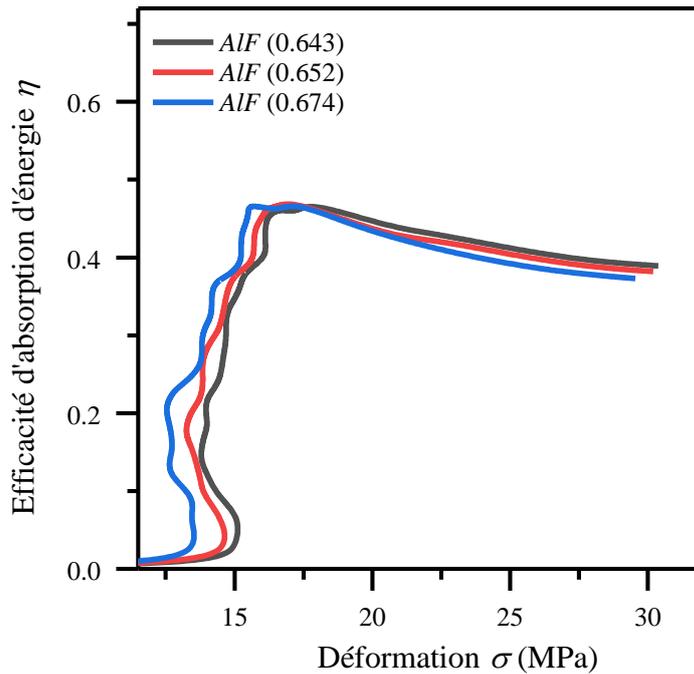


Figure. 3.11 : L'efficacité d'absorption d'énergie vs. la contrainte

### 3.3.2 Capacité d'absorption d'énergie par unité de masse

Il existe souvent des limitations sur l'espace et la masse des matériaux nécessaires pour absorber l'énergie, de sorte que les composants absorbant l'énergie doivent être légers et avoir une capacité d'absorption d'énergie élevée. Il faut donc tenir compte à la fois de la capacité d'absorption d'énergie de la mousse et de sa légèreté. Par conséquent, les valeurs d'énergie absorbée par unité de masse  $W_m$  ont été déterminées, qui est le rapport d'absorption d'énergie par unité de volume  $W_v$  à la densité  $\rho$ .

$$W_v = \frac{1}{\rho} \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3-7)$$

Les courbes  $W_m - \sigma$  des trois mousses d'aluminium à cellules ouvertes sont illustrées à la Figure. 3.12, et elles présentent des caractéristiques entièrement distinctes des courbes  $W_v - \sigma$  de la Figure. 3.9. Alors qu'aux mêmes valeurs de contrainte, la mousse à cellules ouvertes à haute porosité a un  $W_m$  plus élevé.

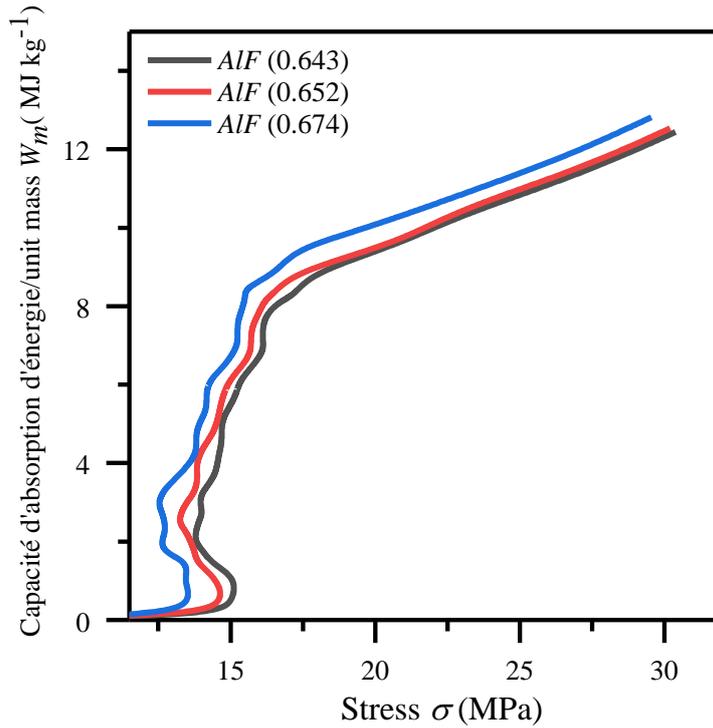
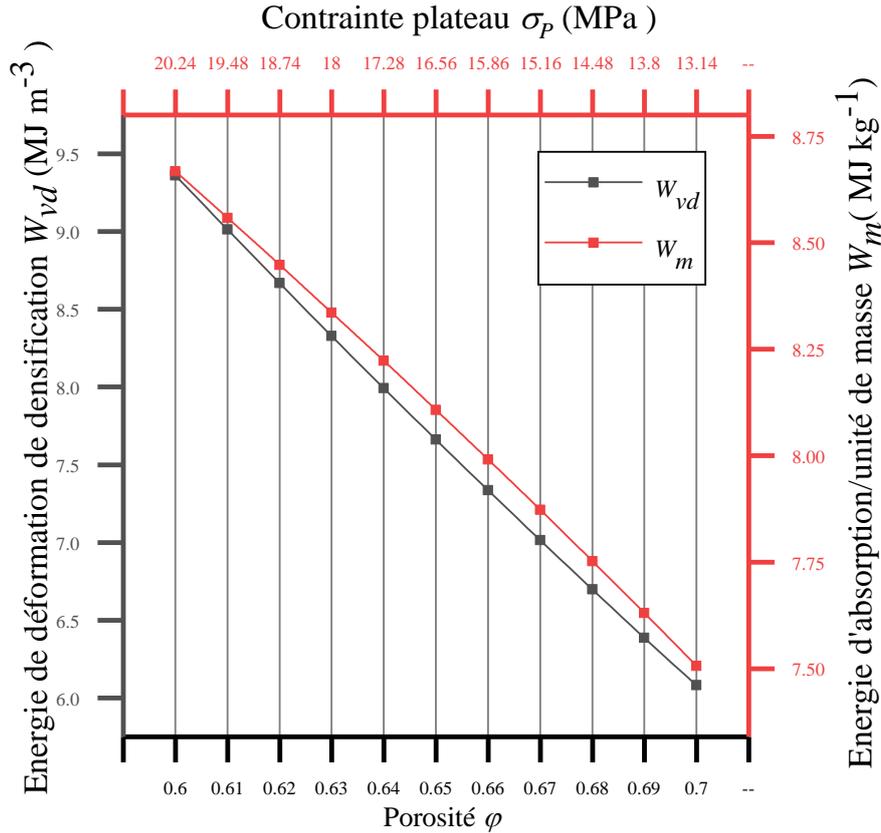


Fig. 3.12. Courbes  $W_m$ - $\sigma$  des mousses d'aluminium à cellules ouvertes de différentes porosités.

### 3.4 Guide d'absorption d'énergie

Une ligne directrice graphique dérivée des courbes d'ajustement précédentes a été proposée pour sélectionner la meilleure mousse d'aluminium à cellules ouvertes modérées pour l'absorption d'énergie, en tenant compte du volume, de la masse et de la protection corporelle sujette aux collisions. La valeur de contrainte plateau pourrait être considérée comme la contrainte maximale admissible pour la protection, comme illustré à la Figure 8. Pour les meilleures conditions de service de la mousse d'aluminium à cellules ouvertes modérée, la valeur de contrainte maximale de protection est déterminée, à partir de laquelle la valeur de la porosité et sa capacité d'absorption d'énergie par unité de volume ou sa capacité d'absorption d'énergie par unité de masse sont déterminées.



**Fig. 3.13. Un schéma de sélection de mousse avec la meilleure porosité pour l'absorption d'énergie**

### 3.5 Etude expérimentale de la localisation de la déformation

Pour la localisation de la déformation, nous avons utilisé une technique simple. Le principe est basé sur le traitement des images des éprouvettes durant les essais de compression. Où des photos du début de la déformation ont été prises pour chaque échantillon afin d'étudier les premières zones du début de la déformation. La localisation de la déformation intervient dans les zones où les cellules sont les plus grosses initialement. La déformation se localise dans une ou plusieurs endroits comme observée dans la zone bas de l'éprouvette AIF (0.643) et AIF (0.652) (Fig.7 et 8). Pour l'éprouvette AIF (0.674), la déformation a été observée dans la zone centrale (Fig.9). Les essais de compression ont montré qu'après l'apparition de rupture des parois, la mousse n'oppose plus aucune résistance. La déformation par propagation de rupture des parois des cellules est donc le principal mécanisme physique de la déformation des mousses en compression.



**Figure 3.13 : Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 20**



**Figure 3.14 : Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 15**



**Figure 3.15 : Cylindre - modes de déformation d'éprouvette PPI 10**

### 3.6 Conclusion

Dans cette partie d'étude, des mousses d'aluminium à cellules ouvertes à porosité modérée ont été étudiés. Leurs paramètres structuraux, leurs propriétés mécaniques et les principaux résultats peuvent être résumés comme suit:

- La densité relative et la porosité distinguent la mousse du matériau de base dont elle est issue. Les mousses d'aluminium obtenues par le processus d'infiltration possèdent une densité relative comprise entre 32 % et 35 %.
- Les courbes de compression des mousses d'aluminium ont montré trois phases typiques : les phases élastiques, le plateau plastique et la densification.
- Les mousses de densité plus élevée ( $0,97 \text{ g/cm}^3$ ) et de porosité plus faible (0,643) ont le module d'Young le plus élevé (0,55 GPa), et la contrainte plateau peut atteindre (16,66 MPa) .
- Les mousses d'aluminium à cellules ouvertes à faible porosité sont particulièrement sensibles aux phénomènes d'écrouissage, ce qui entraîne une contrainte plateau nettement élevée. De plus, pour la même souche, la capacité des mousses d'aluminium à cellules ouvertes à absorber l'énergie augmente à mesure que la porosité diminue. Cependant, chaque échantillon peut absorber une énergie plus élevée que les trois échantillons dans une certaine plage de contraintes. La contrainte opérationnelle optimale peut également être estimée pour l'absorption d'énergie lorsque le poids du composant est pris en compte

## Références

- [1] L. Gong, S. Kyriakides, and N. Triantafyllidis, On the stability of kelvin cell foams under compressive loads, *Journal of the Mechanics and Physics of solids*, Vol. 53, No. 4, 2005, 771-794
- [2] A.N.M. Alhusseny, A.Nasser, and N. Al-Zurfi, High-porosity metal foams: potentials, applications, and formulations, in *porosity - process, Technologies and Applications IntechOpen*, 2017.
- [3] V.V. Calmidi, *Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams*, University of Colorado: UMI, 1998.
- [4] M. Erardo, L. Elizondo, B. Farzad, W. Robert, and G. Russell, Casting protocols for the production of open-cell aluminum foams by the replication technique and the effect on porosity, *Journal of Visualized Experiments*, Vol 94, 2014.
- [5] L. Marsavina, J. Kováčik, and E.Linu, Experimental validation of micromechanical models for brittle aluminium alloy foam. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. 83, 2016, 11–18.
- [6] P. Pinto, N. Peixinho, F. Silva, D. Soares, Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with modified cellular geometry. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 214, 2014, 571–577.
- [7] J.Banhart, and J. Baumeister, Deformation characteristics of metal foams. *J. Mater. Sci.*, Vol. 33, 1998, 1431–1440.
- [8] TG, Nieh, K. Higashi, J. Wadsworth, Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. *Mat. Sci. Eng. A Struct. Mater.* Vol. 283, 2000, 105–110.
- [9] C. Korner, R.F. Singer, *Processing of Metal Foams—Challenges and Opportunities*. *Adv. Eng. Mater.* 2000, 2, 159–165.
- [10] YA. Kang, JY, Zhang, and JC. Tan, Compressive behavior of aluminum foams at low and high strain rates. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2007, 14, 301–305. [CrossRef]
- [11] S. Marchic, A. Mortensen, Deformation of open-cell aluminum foam, *Acta Materialia*, Vol. 49, 2001, 3959-3969.
- [12] Jing, L., Su, X., Yang, F., Ma, H., and Zha, L. "Compressive Strain Rate Dependence and Constitutive Modeling of Closed-cell Aluminum Foams with Various Relative Densities", *Materials Science*, Vol. 53, No. 20, (2018), 352-361. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-018-2663-z>
- [13] L.J.Gibson, M.F Ashby: *Cellular solids: structure and properties*, Cambridge University, 1997. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- [14] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann: Boston, MA, USA, 2000..
- [15] F. Yi, Z. Zhu, F. Zu, S. Hu, P. Yi, Strain rate effects on the compressive property and the energy absorbing capacity of aluminium alloy foams, *Materials Characterization*, Vol. 47, No. 5, 2001, 417-422
- [16] L. Stanev, B. Drenchev, A. Yotov, R. Iazarova, Compressive properties and energy absorption behaviour of AlSi10Mg open-cell foam, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 22, No. 1, 2014, 44-53,.
- [17] S. Yu, J. Liu, M. Wei, Y. Luo, X. Zhu, Y. Liu, Compressive property and energy absorption characteristic of open-cell ZA22 foams, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, 2009, 87-90,.

- [18] W.T. Li, X.D Yang, C.N He, J. Sha, C. Shi, J. Li, N. Zhao, Compressive responses and strengthening mechanisms of aluminum composite foams reinforced with graphene nanosheets, *Carbon*, Vol. 153, 2019, 396-406.
- [19] Q.M. Li, I. Magkiriadis, J.J Harrigan, Compressive strain at the onset of densification of cellular solids, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 42, No. 5, 2016, 371-392.
- [20] H. Wang, Y. Fu, M. Su, H. Hao, Effect of structure design on compressive properties and energy absorption behavior of ordered porous aluminum prepared by rapid casting, *Materials and Design*, 167, 2019.

**Chapitre 4**  
**Performance Thermo-hydraulique de la Mousse**  
**d'Aluminium**

## **4.1 Introduction**

Dans ce chapitre, un modèle de transfert de chaleur unidimensionnel a été examiné et vérifié numériquement par une étude expérimentale de mousses d'aluminium à cellules ouvertes avec des valeurs de porosité modérée de 0,643, 0,652 et 0,674. Ceux-ci ont été conçus comme des échangeurs de chaleur. Une analyse de transfert de chaleur a été effectuée, qui combinait la conduction thermique par ligaments, la phase fluide (air) et la chaleur par convection des ligaments au liquide de refroidissement dans les pores. De plus, on a établi une corrélation entre la porosité de la mousse d'aluminium et ses propriétés thermiques sur une surface donnée. De plus, afin de prédire les performances hydrauliques, on a déterminé l'effet de l'imposition de la vitesse de l'air et de la chute de pression sur les trois échangeurs de chaleur.

## **4.2 Performance thermique de la mousse d'aluminium**

Le transfert de chaleur unidimensionnel de mousses métalliques d'aluminium à cellules ouvertes est étudié à la fois expérimentalement et en utilisant des méthodes numériques. Un flux de chaleur constant a été maintenu sur la section de base de la mousse en chauffant électriquement une bobine en forme de plaque. Des équations de transfert de chaleur unidimensionnel ont été dérivées pour la solution numérique du système. Les équations gouvernantes obtenues ont ensuite été discrétisées en utilisant la méthode des différences centrales et finalement résolues avec la méthode des différences finies. Les résultats obtenus ont été convertis en graphiques et comparés aux résultats empiriques obtenus au préalable

### **4.2.1 Analyse numérique du transfert de chaleur unidimensionnelle**

Le modèle d'équilibre énergétique a été calculé et l'équation différentielle est résolue par la méthode de différence finie avec le langage de programmation informatique.

#### **4.2.1.1 Théorie du transfert de chaleur unidimensionnelle**

La mousse d'aluminium est acceptée comme système de transfert de chaleur vers un fluide à partir d'une surface chauffée, où l'analyse du transfert de chaleur est combinée par conduction à travers les ligaments, conduction à travers la phase

gazeuse et convection du ligament au liquide de refroidissement dans les pores. Le bilan énergétique de la direction ( $dz$ ) est déterminé par l'élément de contrôle du volume de la mousse d'aluminium ( $dx dy dz$ ). Les impacts du rayonnement sont négligeables et il n'y a pas d'énergie de conversion interne, comme le montre la fig. 4.1 (a, b). Pour notre système, des formules de distribution de température unidimensionnelle ont été créées.

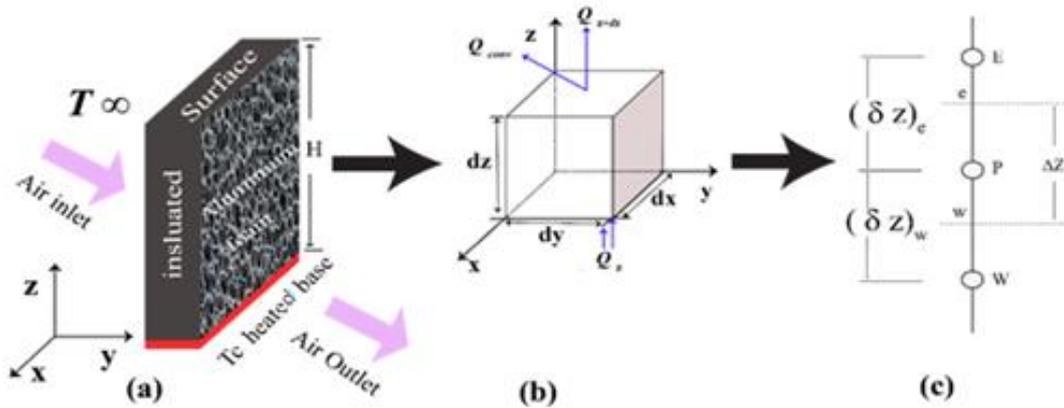


Figure 4.1 : (a) Echantillon de mousse ; (b) Élément de volume de contrôle de la mousse ; (c) Groupe de points de quadrillage pour problème unidimensionnel.

La figure 4.1a montre l'élément de volume de contrôle exposé à un fluide environnant à une température  $T_\infty$  et à une température de la base chauffée  $T_C$ . Le problème est abordé en établissant un bilan énergétique sur une section différentielle de mousse d'aluminium alvéolaire d'épaisseur  $dz$ . Lorsque les quantités sont combinées, le bilan énergétique donne un calcul qui consiste à évaluer l'ensemble des flux de chaleur.

La figure. 4.1b montre que lorsque l'on considère l'élément de volume de contrôle exposé à un fluide environnant à une température  $T_\infty$  et une température de la base chauffée  $T_C$ . Le problème est abordé en établissant un bilan énergétique sur une section différentielle de mousse d'aluminium à cellules ouvertes d'épaisseur  $dz$ . Lorsque les quantités sont combinées, le bilan énergétique entre la tranche élémentaire  $z$  et  $z + dz$  donnerait [1] :

$$Q_z = Q_{z+dz} + Q_{conv} \quad (4-1)$$

Où,

$Q_z$  : flux de thermique transmis par conduction rentrant en  $z$

$Q_{z+dz}$  : flux thermique transmis par conduction sortant en  $z+dz$

$Q_{conven}$  : flux thermique transmis par convection

Dans cette section, la forme typique des cellules ouvertes est décrite comme homogène, sans déséquilibre ni défaut. Il a été appliqué le modèle commun pour la conductivité thermique effective, dérivé de la règle des mélanges [2] :

$$k_{eff} = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_a \quad (4-2)$$

Avec,

$k_{eff}$  : conductivité thermique effective

$\varphi$  : porosité

La loi de Fourier donne les termes de conduction;

$$Q_z = -(1 - \varphi)k_s dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} - \varphi k_a dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} \quad (4-3)$$

$$Q_z = -(1 - \varphi)k_s dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} - \varphi k_a dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} \quad (4-4)$$

$$Q_{z+dz} = -(1 - \varphi)k_s [dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} + dx dy dz \frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2}] - \varphi k_a [dx dy \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} + dx dy dz \frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2}] \quad (4-5)$$

Où  $k_s$  et  $k_a$  sont les conductivités thermiques pour la partie solide et la partie liquide (air), respectivement,  $\varphi$  est la porosité et  $T_{fm}$  est la température de la mousse d'aluminium.

La loi de refroidissement de Newton donne le terme de convection ;

$$Q_{conv} = h_{fm} S_p dx dy dz (T_{fm} - T_{\infty}) \quad (4-6)$$

Où,

$h_f$  : le coefficient de transfert de chaleur par convection

$S_p$  : la surface spécifique

$T_{\infty}$  : la température ambiante.

La substitution de l'équation (4-1) nous donne :

$$-(1 - \varphi)k_s \frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2} - \varphi k_a \frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2} + h_{fm} S_p (T_{fm} - T_\infty) = 0 \quad (4-7)$$

Donc, l'équation (4-7) devient :

$$\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2} = \frac{h_{fm} S_p}{(1-\varphi)k_s + \varphi k_a} (T_{fm} - T_\infty) \quad (4-8)$$

On note que les termes liés au le coefficient de transfert de chaleur par convection, surface spécifique, conductivités thermiques, et la porosité de la mousse métallique sont les paramètres de la mousse et ils sont liés par cette relation suivante:

$$m_{fm}^2 = \frac{h_{fm} S_p}{(1-\varphi)k_s + \varphi k_a} \quad (4-9)$$

Où  $m_{fm}$  est un paramètre de mousse.

L'équation (4-8) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2} - m_{fm}^2 (T_{fm} - T_\infty) = 0 \quad (4-10)$$

Soit  $\theta = (T_{fm} - T_\infty)$ . L'équation (4-10) devient alors:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - m_{fm}^2 \theta = 0 \quad (4-11)$$

#### 4.2.1.2 Equation adimensionnelle

Le but principal d'équation sans dimension est de faciliter une meilleure compréhension et une solution facile d'équation sans impliquer des paramètres physiques.

Rendre l'équation (4-11) sans dimension en utilisant les échelles suivantes :

$$Z = \frac{z}{H} ; \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{H^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2}$$

$$M^2 = H^2 \cdot m_{fm}^2$$

Alors l'équation (4-11) devient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} - M^2 \theta = 0 \quad (4-12)$$

La solution générale pour l'équation (4-12) peut s'écrire comme suit :

$$\theta = C_1 e^{-MZ} + C_2 e^{MZ} \quad (4-13)$$

Condition aux limites :

$$\text{Pour } Z = \begin{cases} 0; & \theta = \theta_0 = (T_c - T_\infty); \theta_0 = C_1 + C_2 \\ 1; & \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0; M(-C_1 e^{-MZ} + C_2 e^{MZ}) = 0 \end{cases}$$

Où  $T_c$  est la température de la base chauffée

En résolvant les constantes  $C_1$  et  $C_2$ , on obtient la solution analytique suivante :

$$\theta_{fm} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{e^{-MZ}}{1+e^{-2M}} + \frac{e^{MZ}}{1+e^{2M}} = \frac{\cosh[M(1-Z)]}{\cosh(M)} \quad (4-14)$$

#### 4.2.1.3 Procédure numérique et conditions limites

Pour cette situation, l'approche la plus fructueuse du problème est fondée sur des techniques de différences finies. Le groupe de points de grille illustré à la figure 4.1(c) est utilisé pour déterminer l'équation des différences finies. Il est présumé que le point de grille est P, qui a les points de grille voisins E et W. pour le problème unidimensionnel, l'épaisseur de l'unité est supposée dans les directions x et y. Ainsi, le volume de contrôle montré est  $1 \times 1 \times \Delta z$ . L'intégration de l'équation (4-12) sur le volume de contrôle donne l'équation suivante [3] :

$$\left( \frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z} \right)_e - \left( \frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z} \right)_w - \int_w^e M^2 \theta_{fm} \partial Z = 0 \quad (4-15)$$

L'équation (4-15) peut s'écrire comme suit :

$$\left( \frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z} \right)_e - \left( \frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z} \right)_w - \int_w^e S \partial Z = 0 \quad (4-16)$$

Où  $S$  est le taux de génération de chaleur.

Evaluer les dérivés  $\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z}$  dans l'équation (4-16) à partir du profil linéaire à la pièce, l'équation résultante sera :

$$\frac{\theta_{fmE} - \theta_{fmP}}{(\delta Z)_e} - \frac{\theta_{fmP} - \theta_{fmW}}{(\delta Z)_w} - \bar{S} \Delta Z = 0 \quad (4-17)$$

$$\frac{\theta_{fmE} - \theta_{fmP}}{(\delta Z)_e} - \frac{\theta_{fmP} - \theta_{fmW}}{(\delta Z)_w} - \bar{S} \Delta Z = 0 \quad (4-18)$$

Lorsque  $\bar{S}$  est la valeur moyenne de  $S$  sur le volume de contrôle, il est utile de formuler l'équation de discrétisation (4-18) sous la forme suivante :

$$a_P \theta_{fmP} = a_E \theta_{fmE} + a_W \theta_{fmW} + b \quad (4-19)$$

Où:

$$\bar{S} = S_c + S_p \theta_{fmP} \quad (4-20a)$$

$$a_E = \frac{1}{(\delta Z)_e} \quad (4-20b)$$

$$a_W = \frac{1}{(\delta Z)_w} \quad (4-20c)$$

$$a_P = a_E + a_W + S_p \quad (4-20d)$$

$$b = -S_c \quad (4-20e)$$

Où  $\theta_{fmE}$  et  $\theta_{fmW}$  sont des températures sans dimension aux points voisins,  $\theta_{fmP}$  est la température sans dimension au point central de la grille,  $S_c$  se tient de la partie constante de  $\bar{S}$  et  $S_p$  est le coefficient de  $\theta_{fmP}$ .

Ici

$$S_c = 0 \text{ et } S_p = -M^2$$

Condition aux limites :

$$\text{Pour } Z = \begin{cases} 0, & \theta_{fm} = 1, \\ 1, & \frac{\partial \theta_{fm}}{\partial z} = 0, \left(\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial z}\right)_e = 0, \frac{\theta_{fmE} - \theta_{fmP}}{(\delta Z)_e} = 0, \theta_{fmE} = \theta_{fmP}, (\theta_{i+2} = \theta_i) \end{cases}$$

Le langage de programmation informatique utilisé pour résoudre l'équation (4-19) était Gauss-Seidel. Cette méthode a été utilisée pour résoudre cette équation numériquement.

## 4.2.2 Méthode expérimentale

### 4.2.2.1 Préparation des mousses d'aluminium

Pour tester la validité du résultat numérique et afin de mesurer la distribution de température dans la direction unidimensionnelle. Trois échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes de dimensions 20 x 70 x 160 mm ont été testés pour corroborer les résultats numériques susmentionnés. L'aluminium a été utilisé comme matériau de base (Al99.5) avec une densité de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. D'autres paramètres de mousse d'aluminium sont présentés au tableau 4.1.

### 4.2.2.2 Appareils d'essai

Le système expérimental (montage) est présenté dans la figure 4.2. Le montage comprend les principaux composants suivants : canal, section d'essai, moteur de soufflante, contrôle du débit, manomètre de pression d'air différentiel AS510 SMART SENSOR 0~100 mbar avec une précision de 1,5%, anémomètre numérique MT-4615 avec une plage de mesure de 0,8 à 40 m/s avec une précision de 2 %, Arduino Uno R3, gamme de thermocouples du type K de 0 à 800 °C d'erreur limite de 0,75 %, base chauffée et un ordinateur. Trois échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes avec des porosités différentes de 0,643, 0,652 et 0,674 avec des dimensions de 70 x 20 x 160 mm ont été utilisés. La température de la base chauffée était contrôlée et variée de 50 °C à 250 °C (la surface de base de la mousse d'aluminium à 80 °C de flux de chaleur selon la vitesse de l'air pour la maintenir constante). Le débit d'air dans le canal a été étalonné à deux vitesses de 1 m/s et 2 m/s. Un manomètre de pression d'air différentiel a été utilisé pour mesurer la chute de pression entre l'entrée et la sortie des sections d'essai. Huit thermocouples ont été fixés à l'échantillon à une distance égale à (20 mm) l'un de l'autre tout en étant

allongés sur l'axe Z vertical ( $H = 160$  mm). Les paramètres de la mousse sont indiqués dans le tableau 3.1.

#### 4.2.2.3 Procédure de mesure

On note que les essais ont été effectués à la pression atmosphérique, et la température de l'air d'entrée se situe entre  $24$  °C et  $25$  °C. Le système de mesures de la température a été étalonné avant les essais, et le processus d'étalonnage consiste à comparer la précision de mesure du thermocouple à une référence connue et standard (bain thermostatique avec sonde de référence de mesure de la température). Une fois les conditions de transfert de chaleur stabilisées, les valeurs de température ont été enregistrées pour tous les points de mesure du système et transférées à un ordinateur à l'aide d'un enregistreur de données. Les données expérimentales ont été évaluées dans un environnement unidimensionnel, et les données enregistrées ont été utilisées pour les calculs et le tracé graphique pour déterminer le rendement du système.

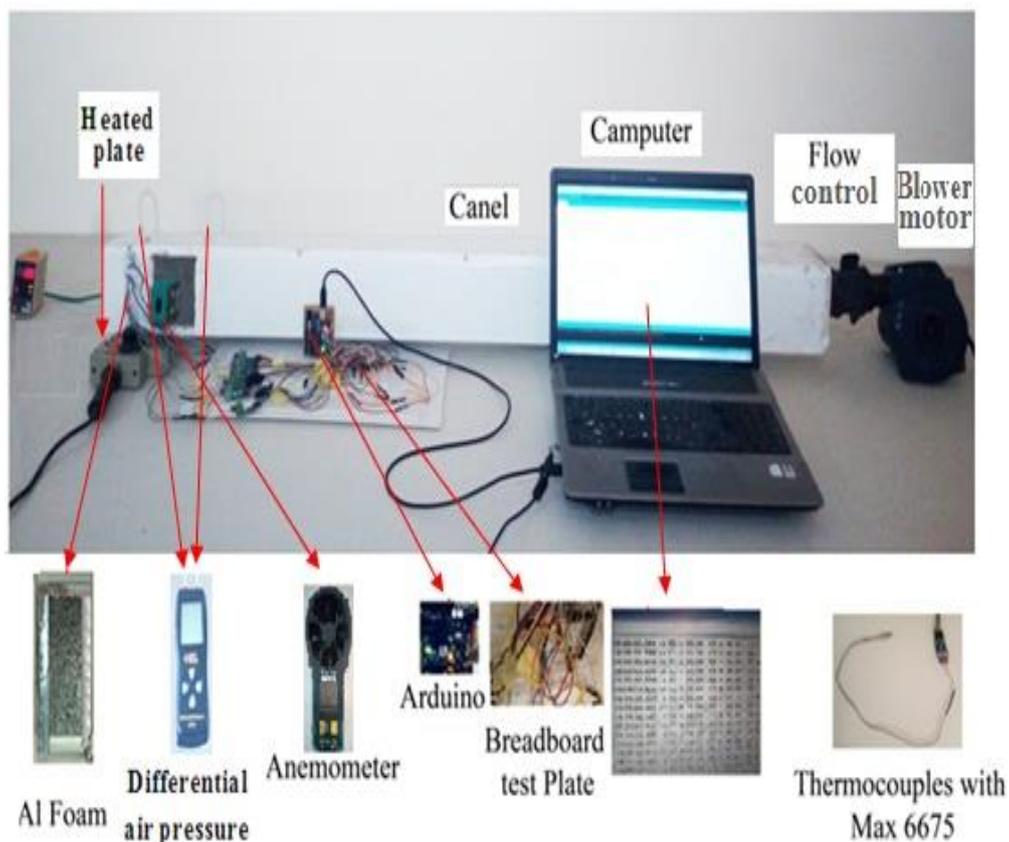


Figure 4.2 : Vue de la section d'essai de la distribution de température unidimensionnelle et la chute de pression

z (mm) ( base chauffée)	Thermocouples N°
	1
20	2
40	3
60	4
80	5
100	6
120	7
140	8
160	9
Ambiante	10

**Tableau 4.1 : Emplacements des thermocouples**

#### 4.2.2.4 Analyse d'incertitude

Les erreurs expérimentales existent toujours dans les expériences en raison de la conception de l'appareil d'essai et de la précision de l'équipement de mesure. Les résultats de l'expérience de cette étude pourraient être influencés par ces facteurs. L'approche de Kline et McClintock [4] a été utilisée pour calculer l'incertitude des données expérimentales. L'équation générale de cette méthode est la suivante :

$$U_R = \frac{\sigma_R}{R} = \pm \left[ \frac{1}{R^2} \left( \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (4-21)$$

Où  $\sigma_R$  est l'incertitude dans le résultat et  $w_1, w_2, \dots, w_n$  sont les incertitudes dans les variables indépendantes.

Lorsque R est le résultat d'une expérience, il peut être exprimé comme  $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$  où  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sont les variables indépendantes.

Les fourchettes d'incertitude obtenues par la précision de mesure de Z,  $\theta_{fm}$  et  $U_R$  ont été estimées à environ :  $\pm 1,5 \%$ ,  $\pm 1,1 \%$  et  $\pm 2,7 \%$  respectivement.

#### 4.2.2.5 Corrélation empirique

Selon l'étude de Bhattacharya et al. [5] la conductivité thermique effective de la mousse dépend de la porosité et du rapport des sections transversales des fibres. Sur la

base de cette hypothèse et pour étudier la relation entre la température de distribution et  $Z$  ( $\theta_f - Z$ ), et afin de décrire les paramètres effectifs de la distribution de température unidimensionnelle de la mousse d'aluminium. Après une analyse appropriée utilisant les résultats numériques et les données expérimentales, une corrélation empirique a été proposée entre la distribution de température, la porosité, la surface spécifique, le coefficient de conductivité pour la partie solide, le coefficient de transfert de chaleur et le diamètre des fibres. La formule relationnelle s'écrit :

$$\theta_f = e^{A Z \ln(1-\varphi) \left[ \frac{h_f d_f}{k_s} \right]^{0.35}} / (d_f S_P)^{0.75} \quad (4-22)$$

$A = 35$  s'est avéré être l'ajustement le plus excellent pour toutes les données. Les graphiques des données expérimentales ainsi que la corrélation sont présentés dans la figure 4.6.

#### 4.2.3 Caractéristique de transfert de chaleur d'échangeur en mousses d'aluminium

Des simulations ont été exécutées avec les données expérimentales comme entrée pour une variété de porosité de mousse dans la gamme de 0,643, 0,652 et 0,674, respectivement. En outre, les vitesses de l'air couvrant les spécimens et les conditions ont été testés pour voir comment les prédictions numériques se comparaient aux résultats expérimentaux.

La figure 4.3 montre les profils de température de trois échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes à une distance unidimensionnelle, où les profils de température diminuent de façon exponentielle. Ceci est cohérent avec les conclusions de Dukhan et Chen [6]. A une distance d'environ 0,7, la température des mousses descend jusqu'à la température ambiante. Près de la base chauffée, il y a la plus grande baisse de température, indiquant que la majorité du transfert de chaleur se produit dans une zone proche de la base chauffée. Le reste de la zone a un faible taux de transfert de chaleur.

Comme le montrent les profils de la figure 4.4, à la surface spécifique élevée, la chute de température est lente, alors qu'elle est plus rapide à la surface spécifique inférieure. Il est clair que la chaleur est stockée dans des zones à plus grande surface spécifique.

Comme le montre la figure 4.5, les données empiriques ont donné un accord raisonnable avec les résultats numériques. Cependant, il existe une variation marquée, en particulier lorsque  $0,3 < Z < 0,9$ , cela est dû au fait que la méthode numérique décrit la forme typique des cellules ouvertes comme homogènes, sans anomalie ni défaut. Ces caractéristiques sont à l'origine de la différence entre les prédictions et les résultats expérimentaux. Les données expérimentales montrent que les profils de température se dégradent presque de façon exponentielle. La courbe de la mousse PPI 10 est la plus basse des deux, alors que l'on remarque que les deux courbes de la mousse PPI 20 et de la mousse PPI 15 sont par convergentes. Cela démontre l'efficacité de la porosité et de la surface spécifique. On peut voir que les profils de température sont presque identiques à  $Z$  inférieur à 0,1, et que cette zone à la chute de température la plus importante, ce qui montre que la majorité des transferts de chaleur se produit dans une zone proche de la base chauffée. A grande distance de la base chauffée, la température baisse progressivement, ce qui montre que cette zone à un taux de transfert de chaleur plus faible. La température chute plus rapidement dans les échantillons à faible PPI (dans le cas de PPI 10 et PPI 15) que dans les échantillons à forte densité de pores (PPI 20). À une distance sans dimension d'environ 0,9, la température diminue jusqu'à la température ambiante. La chute de température la plus importante s'est produite pour la mousse d'aluminium, avec une surface spécifique de  $782 \text{ m}^{-1}$ . Par conséquent, ces profils confirment le taux de transfert de chaleur inférieur dans la mousse avec 10 PPI. Alors que beaucoup de chaleur s'est accumulée dans la mousse avec 20 PPI sur une surface spécifique plus grande, ce qui a entraîné un transfert de chaleur accru. Ceci est conforme aux conclusions de Nawaz [7]. Évidemment, les profils de température se situent les uns au-dessus des autres à une distance sans dimension d'environ 0,9 à 1. Cela signifie qu'ils ont des performances thermiques similaires dans cette zone.

La figure 4.6 montre les prédictions de la corrélation empirique et qui sont en excellent accord avec les données expérimentales. Une conclusion claire est que notre modèle peut être généralement utilisé pour la mousse d'aluminium.

La figure 4.7 présente les profils de dépendance en  $Z$  de la température ( $\theta_f(Z)$ ) pour 15 PPI à des vitesses de 1 m/s et 2 m/s. On peut voir que la distribution de température diminue à mesure que les vitesses augmentent. Cela suggère un taux de transfert de chaleur plus faible pour des vitesses plus élevées.

Par conséquent, d'une part, ces résultats illustrent que le taux de transfert de chaleur plus élevé se produit dans les zones à faible porosité et à plus grande surface spécifique, car à mesure que la porosité diminue, la conductivité thermique augmente, et a des valeurs plus élevées de surface spécifique, beaucoup de chaleur est stockée.

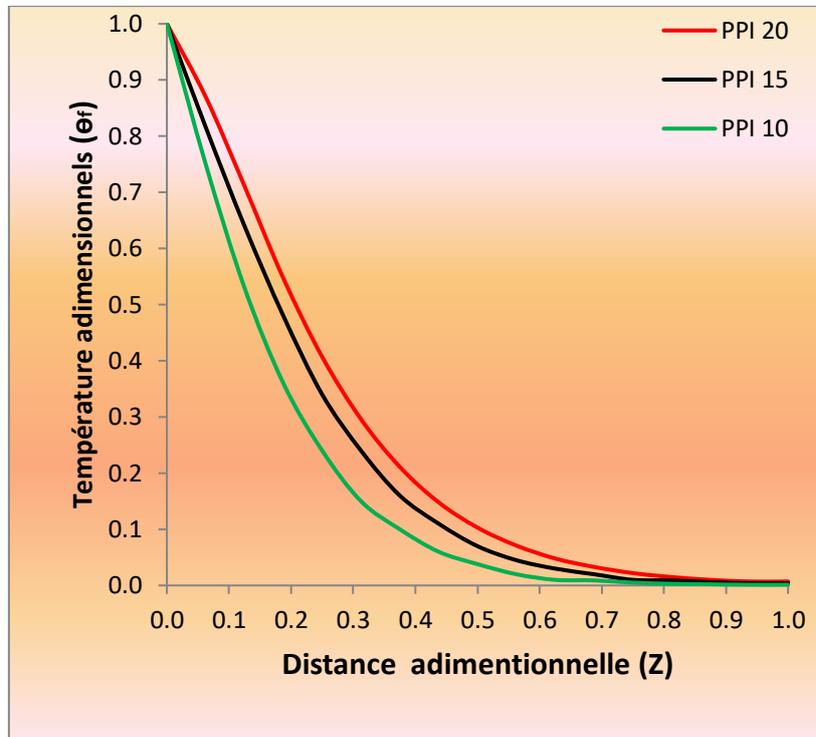


Figure 4.3 : Résultats numériques de  $\theta_{fm}$  en fonction  $Z$  pour divers échantillons à la vitesse d'écoulement 1m/s (cette fonction est tracée pour l'aluminium ( $k_s= 202 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ ), l'air ( $k_a= 0,0265 \text{ W / m.}^\circ\text{C}$ ) et ( $h_{fm}= 200 \text{ W/m}^2,^\circ\text{C}$ )

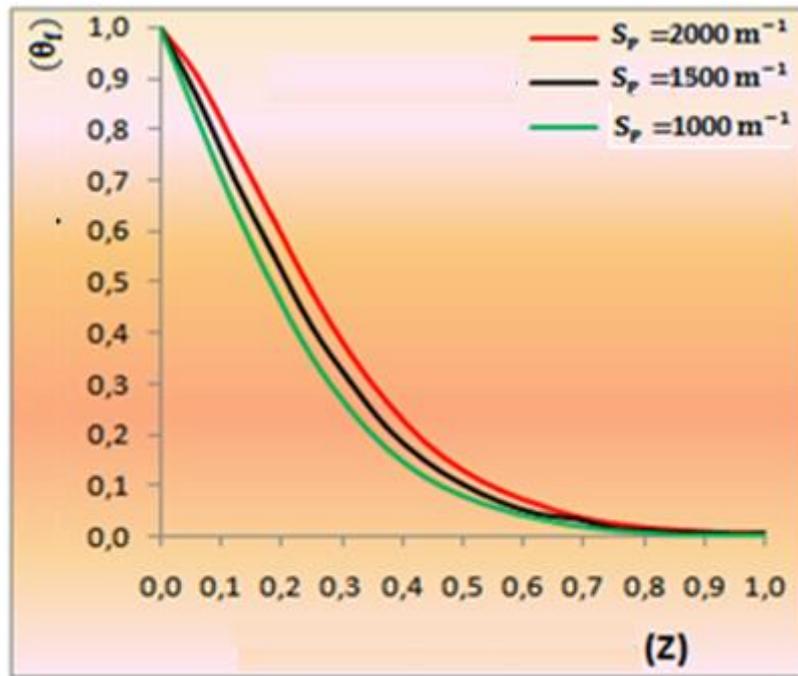


Figure 4.4 : Variation de  $\theta_{fm}$ - $Z$  basée sur une solution numérique à différentes valeurs de  $S_p$  (où  $\varphi=0,65$ )

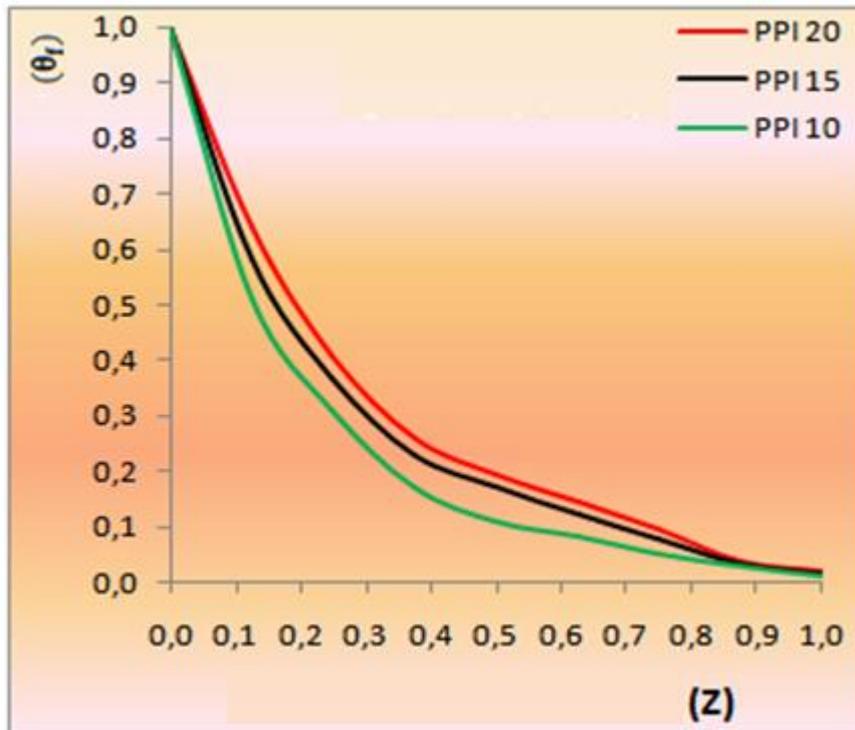


Figure 4.5 : Résultats expérimentaux de  $\theta_f$  en fonction  $Z$  pour divers échantillons à la vitesse d'écoulement 1m/s.

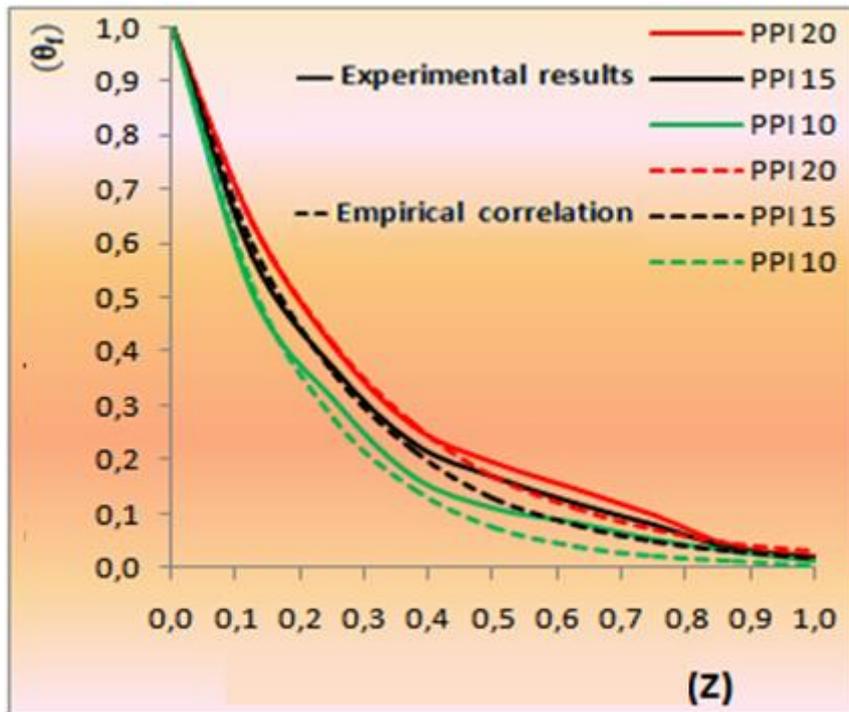


Figure 4.6 : Résultat expérimentales vs prédictions de corrélation empiriques (Eq. (4-22)).

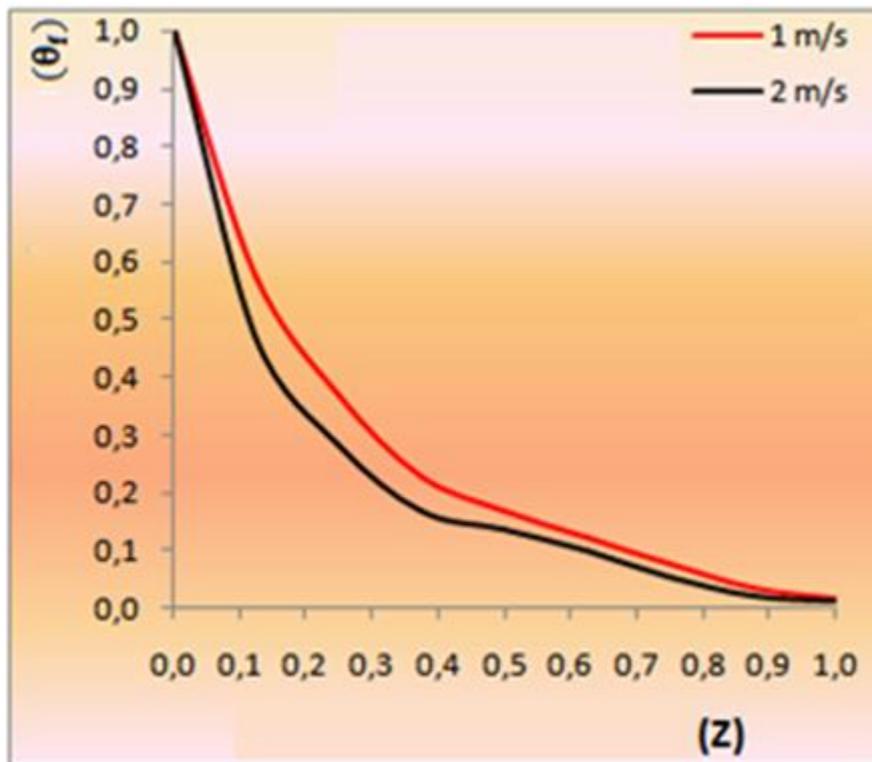


Figure 4.7 : Résultats expérimentaux de  $\theta_f$ -Z pour 15 PPI à différentes vitesses

#### **4.2.4 Effet de la porosité sur le transfert de chaleur dans les mousses d'aluminium**

La porosité est l'un des paramètres critiques de la mousse d'aluminium, qui pourrait déterminer la conductivité thermique efficace. Sumirat et al. [8] ont constaté que le transfert de chaleur est également affecté par la porosité de la mousse d'aluminium. Par conséquent, l'étude numérique et expérimentale montre que la porosité est un aspect principal du transfert de chaleur, l'effet de la porosité de la mousse sur le transfert de chaleur combiné par conduction thermique et par convection thermique de la mousse d'aluminium à cellules ouvertes avec des valeurs de porosités de 0,643, 0,652 et 0,674 en utilisant une méthode à éléments finis unidimensionnels.

#### **4.2.3 Conductivité thermique effective (CTE)**

La majorité des paramètres nécessaires au modèle peuvent être mesurés ou estimés avec une précision raisonnable. Cependant, un des paramètres, le coefficient de conductivité thermique effective de l'échantillon, était difficile à estimer. Ainsi, pour la mesure exacte de ce coefficient, il doit être mesuré expérimentalement et ceci est en dehors de la portée de cette recherche. Mais toutefois, ce paramètre doit être estimé.

La majorité des études ont été faites sur la mousse métallique du type cellulaire à une porosité élevée (0,8-0,95 %), et les mousses fabriquées pour cette étude avaient une porosité (0,63-0,67) et leur structure est différente de la mousse métallique du type cellulaire par exemple, la mousse métallique du type cellulaire a une porosité élevée (80-95 %) est obtenue par Calmidi et Mahajan [9]. Bhattacharya et al. [5] en utilisant l'eau et l'air comme phase fluide dans les mousses d'aluminium, ils ont proposé une corrélation empirique entre CTE et la porosité. Boomsma et Poulikakos [10]. ont proposé un modèle (CTE) basé sur une structure cellulaire idéalisée en trois dimensions de mousse métallique en utilisant la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur.

Pour estimer la conductivité thermique effective des mousses, nous avons utilisé des modèles analytiques contenant des similitudes de porosité proposées par Abuserwal et al. [11] qui ont présenté une corrélation empirique pour déterminer CTE. Ils ont conclu que CTE diminue avec l'augmentation de la porosité, mais il n'a pas trouvé l'influence de la taille des pores. Belcher et al. [12] ont proposé un polynôme de corrélation analytique de deuxième ordre pour CTE en fonction de

porosité. Wang et al. [13] ont proposé un modèle fondé sur le développement de polynômes de deuxième ordre à diverses structures de mousse d'aluminium. De plus, l'analyse de méthode est également développée pour déterminer la valeur de  $k_{eff}$ . En raison de la grande différence dans les propriétés thermiques entre le métal et l'air, la loi de mélange est un modèle linéaire et très commun qui est basé sur la conductivité thermique et la porosité de chaque substance (métal-fluide), ce modèle appliqué pour estimer CTE [2], comme le montre dans l'équation (1.10), ne convient pas à la mousse métallique.

#### 4.2.3.1 Détermination analytique

Pour déterminer CTE, des échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes, quatre modèles ont été utilisés : le mode linéaire [2], le modèle d'Abuserwal et al. [11], le modèle de Belcher et Schunk [12] et le modèle de Wang et al. [13]. Le modèle linéaire est un modèle très courant qui est basé sur la conductivité thermique de chaque substance (métal-fluide) et la porosité. Ce modèle appliqué pour estimer l'CTE [44] et qui est dérivé de la règle des mélanges :

$$k_{eff} = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_f \quad (4-23)$$

Abuserwal et al. [11] ont proposé un modèle basé sur une corrélation empirique pour CTE avec des porosités variant de 0,5 à 1 :

$$k_{eff} = k_s(1 - \varphi)^{2.15(1-\varphi)^{0.16}} \quad (4-24)$$

Belcher et Schunk [12] ont proposé un modèle basé sur un polynôme quadratique pour la conductivité thermique effective avec des porosités allant de  $0 \leq \varphi \leq 1$  :

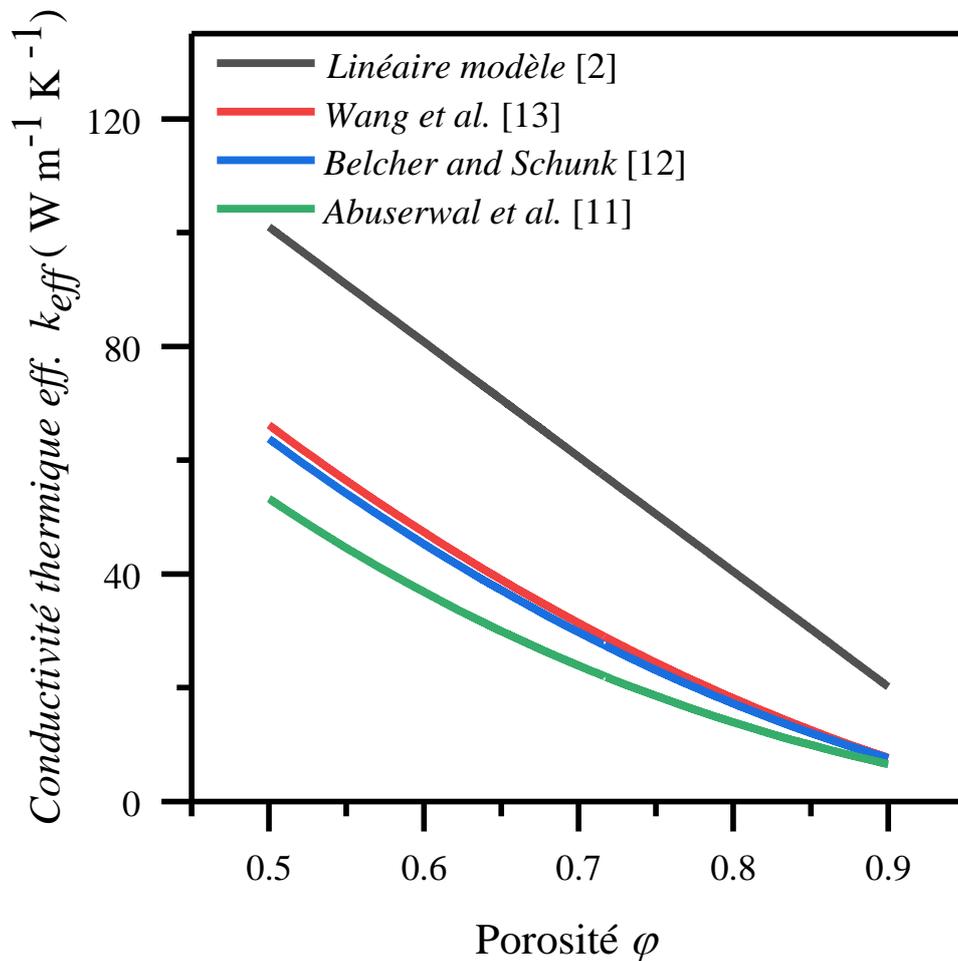
$$k_{eff} = k_s(0.7313\varphi^2 - 1.7188\varphi + 0.9922) \quad (4-25)$$

Wang et al. [13] ont proposé un modèle basé sur le développement de polynômes du second ordre à différentes structures (tétraïcaèdre, structure cubique, topologies octet face diagonale (FD)-Cube, de mousse d'aluminium, puis ont proposé une corrélation générale basée sur les 4 structures examinées avec porosités variant de  $0 \leq \varphi \leq 1$  :

$$k_{eff} = k_s \left[ \left( 0.6899\varphi^2 + \frac{k_f}{k_s} - 1.6899 \right) \varphi + 1 \right] \quad (4-26)$$

On peut noter que la valeur de CTE principalement affectée par la porosité et la conductivité thermique.

Suite de ces équations, des courbes ont été tracées pour une plage de porosité (0.5-0.9) avec de coefficient de conductivité thermique pour l'aluminium ( $k_s=202 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ) comme phase solide et pour l'air ( $k_f=0.0265 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ) comme phase fluide (Fig.4.8).



**Figure 4.8 : Conductivité thermique effective vs. porosité ( $k_s = 202 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  et  $k_f = 0.0265 \text{ W/ m.}^\circ\text{C}$ )**

Le tableau 4.2 présente les valeurs de coefficient de conductivité effective pour les trois échantillons obtenus.

modèle théorique	$k_{eff} [w. m^{-1}. k^{-1}]$		
	Echantillon AIF (0.643)	Echantillon AIF (0.652)	Echantillon AIF (0.674)
Linéaire [2]	72.13	70.31	65.87
Abuserwal et al. [11]	30.88	29.71	26.95
Belcher et Schunk [12]	38.25	36.85	33.52
Wang et al. [13]	40.14	38.69	35.25

**Tableau 4.2 : Valeurs de conductivité thermique effective des mousses d'aluminium.**

Selon la figure 4.9 et le tableau 4.2, CTE a diminué à mesure que la porosité augmentait. Dans la règle de mélange simple, ne peut pas être appliquée pour estimer CTE, car elle ne prend pas en compte la structure du milieu poreux et les paramètres des mousses métalliques [2]. On constate que la valeur du modèle d'Abuserwal et al. [11] est légèrement inférieure aux valeurs du modèle de Belcher et Schunk [12] et du modèle de Wang et al. [13]. A partir de ces résultats, une idée des valeurs attendues peut être obtenue de CTE des mousses d'aluminium à cellules ouvertes qui ont été produites. Comme les résultats des deux derniers modèles sont proches l'un de l'autre, la valeur de CTE selon ces deux modèles a été déterminée dans ce travail.

### 4.3 Etude expérimentale de chute de pression

On note que la chute de pression sur les échantillons a été mesurée à l'aide d'un transmetteur de pression différentielle (manomètre de pression différentielle) ( Fig. 2). La perte de pression de chaque échantillon a été mesurée à 5 débits différents et la mesure a été répétée 10 fois pour chaque débit.

Toutes les données de pression ont été enregistrées et les divisant par la longueur de l'échantillon. Une courbe a été ajustée à travers les points de données pour chaque échantillon. La figure 4.9 montre les données expérimentales de chute de pression pour trois échantillons représentant trois tailles de pores par rapport à la vitesse. Les échantillons ont été testés pour une vitesse allant de 0.5 m/s jusqu'à 2.5 m/s. Il s'agissait de la vitesse la plus élevée qui pouvait être atteinte et la chute de pression

devait être mesurée pour tous les échantillons, c.-à-d. que la plage maximale de débit était atteinte par les ventilateurs pour l'échantillon ayant la plus petite taille de pore.

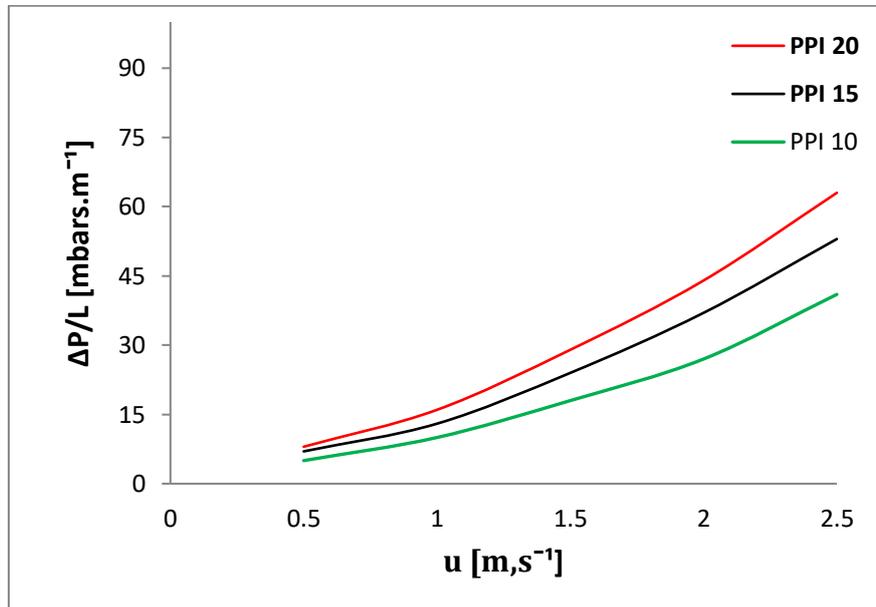


Figure 4.9 : la chute de pression par rapport la vitesse d'écoulement

#### 4.3.1 Comparaison des résultats avec les travaux des autres chercheurs

Afin de vérifier que les résultats produits, les résultats ont été comparés à ceux de corrélation de Tanaka et al [14] et de Choi et al [15]. Pour générer les données de chute de pression basée sur la corrélation empirique de Tanaka. L'Equation 4-27 a été utilisée pour calculer la chute de pression pour l'échantillon PPI 20. Afin de présenter le résultat de Tanaka basé sur la chute de pression et la vitesse de l'air, nombre de Reynolds converti en vitesse par l'éq. 4-29 et l'éq. 4-30; et le facteur de frottement converti en chute de pression par l'éq. 4-28.

$$f_h = \frac{175}{Re_h} + 1.6 \quad (4-27)$$

$$f_h = \frac{\Delta P D_h}{0.5 \rho u^2 L} \quad (4-28)$$

$$Re_h = \frac{D_h \rho u}{\mu} \quad (4-29)$$

$$D_h = \frac{4\varphi d_p}{6.9(1-\varphi)} \quad (4-30)$$

Des mesures similaires ont été prises pour calculer les données de pression à partir de la corrélation du facteur de frottement [Choi et al. [15]]. Le nombre de Reynolds et le diamètre hydraulique ont été calculés à l'aide des équations 4.29 et 4.30 et du facteur de frottement et des données de pression de l'équation 4.31 et 4.32.

$$f_h = \frac{33.6}{Re_h} + 0.337 \quad (4-31)$$

$$f_h = \frac{\Delta P D_h}{2\rho u^2 L} \quad (4-32)$$

Le résultat de la chute de pression maximale de l'échantillon de treillis sous flux variante contre la vitesse d'air est représenté dans la figure 4.10.

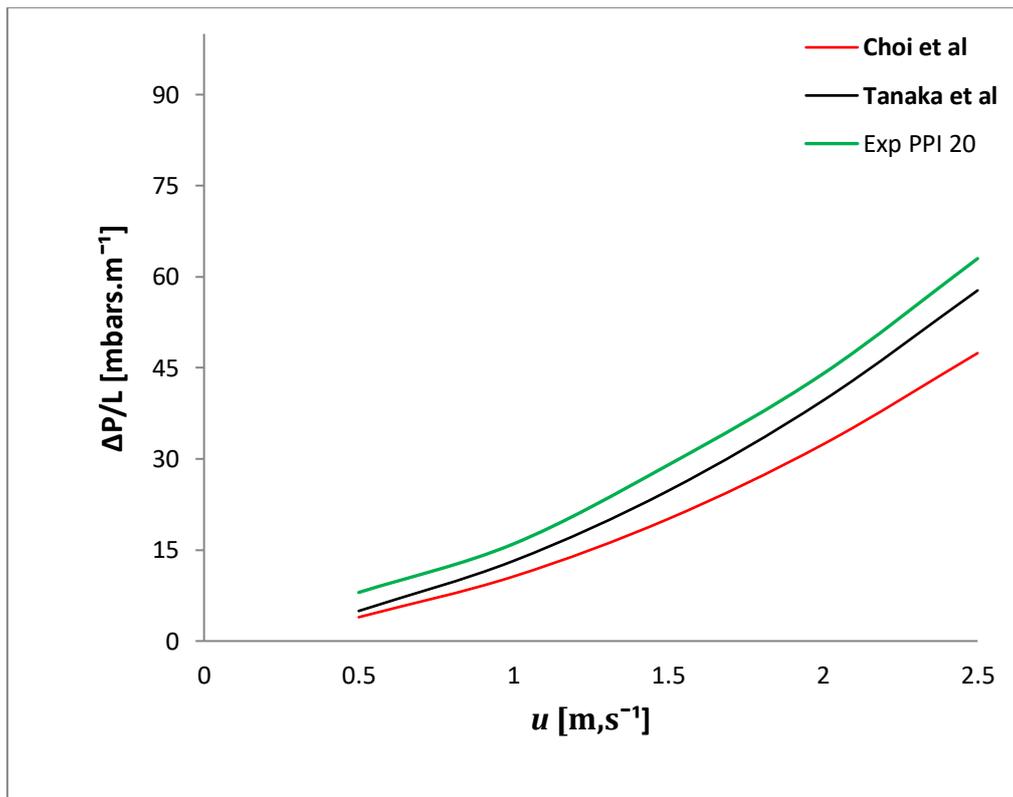


Fig. 4.10 La chute de pression maximale sous flux variante

La chute de pression mesurée de la corrélation Tanaka et al [14] et de Choi et al [15] étaient légèrement inférieures à nos résultats. Ju et Shen [16] ont comparé quatre

corrélations de facteurs de frottement [17-20] et montré des variations encore plus importantes dans les données de chute de pression. Ils ont fait valoir que la raison de cet écart venait des différences dans les propriétés géométriques.

#### **4.4 Conclusion**

Ce chapitre a discuté des effets de divers paramètres (température, surface spécifique, porosité, diamètre des fibres, vitesse de l'air et chute de pression) sur le transfert de chaleur des mousses d'aluminium à cellules ouvertes. Une évaluation approfondie des approches numériques et expérimentales a également été menée.

En combinant la conduction thermique et la convection d'une mousse d'aluminium à cellules ouvertes avec des valeurs de porosités de 0,643, 0,652 et 0,674 en utilisant une méthode d'élément fini unidimensionnel. Les résultats indiquent que le gradient de température le long de la mousse a diminué plus rapidement près de la base chauffée et ralenti en s'éloignant, et que la température baisse lentement sur une surface spécifique plus grande et plus rapidement sur la surface spécifique plus petite. L'analyse unidimensionnelle du transfert de chaleur dans la mousse d'aluminium a ensuite été confirmée par l'expérience.

Les premiers résultats ont montré un accord raisonnable entre les données numériques et expérimentales. Les variations des échantillons avec la porosité, la surface spécifique et le diamètre des fibres ont prouvé que leurs effets sont évidents dans les propriétés de transfert de chaleur des mousses d'aluminium, en témoigne la corrélation empirique qui s'est avérée en grande concordance avec les résultats expérimentaux. Il a été découvert expérimentalement qu'un taux de transfert de chaleur plus élevé pour une densité élevée de pores et un taux de transfert de chaleur plus faible pour des vitesses plus élevées ont été obtenus. En outre, une mousse à faible porosité a une chute de pression significativement plus élevée.

Cette partie de l'étude démontre que la porosité, les surfaces spécifiques et le diamètre des fibres de la mousse d'aluminium ont un effet sur le transfert de chaleur. Les performances de transfert de chaleur de la mousse d'aluminium à cellules ouvertes sont liées au contact ponctuel accru disponible entre la base chauffée et la mousse d'aluminium.

## Références

- [1] JP. Holman, heat transfer, 10th Edition, Published by McGraw-Hill, New York. 2010
- [2] CY. Zhao, Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, 2012, 3618-3632.
- [3] SV. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow. eBook Published, CRC Press, Boca Raton, 2018
- [4] SJ. Kline, and FA. McClintock Describing uncertainties in single sample experiments. *Mech. Eng.* Vol. 75, 1953, 385–387.
- [5] A. Bhattacharya, VV. Calmidi, and RL. Mahajan Thermophysical properties of high porosity metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, 2002, 1017–1031.
- [6] N. Dukhan, and K. C. Chen, “Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 32, No. 2, 2007, 624–631. doi:10.1016/j.expthermflusci.2007.08.004.
- [7] K. Nawaz, Metal foams as novel materials for air-cooling heat exchangers, *Mechanical Engineering*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011, doi: hdl.handle.net/2142/29424.
- [8] I. Sumirat, Y. Ando, and S. Shimamura, Theoretical consideration of the effect of porosity on thermal conductivity of porous materials, *Journal of Porous Materials*, Vol. 13, 2006, 439–443
- [9] V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams, *Journal of Heat Transfer*, 121 (1999) 466-471.
- [10] K. Boomsma, D. Poulikakos, F. Zwick, Metal foams as compact high performance heat exchangers, *Mechanics of Materials*, 35 (2003) 1161-1176.
- [11] A.F. Abuserwal, E.M. Elizondo Luna, R. Goodall, R. Woolley: The effective thermal conductivity of open-cell replicated aluminum metal sponges, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, 2017, 1439-1448. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.023>
- [12] T. Belcher, G. Schunk: Thermal characterization of 3D printed lattice structures, *Thermal & Fluids Analysis Workshop TFAWS*, Hampt. VA., 2019.
- [13] N. Wang, I. Kaur, P. Singh, L .Li: Prediction of effective thermal conductivity of porous lattice structures and validation with additively manufactured metal foams, *Applied Thermal Engineering*, Vol.187, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116558>
- [14] Tanaka, M., Yamashita, I., and Chisaka, F., 1990, “Flow and Heat Transfer Characteristics of the Stirling Engine Regenerator in an Oscillating Flow,” *JSME Int. J.*, 33(2), pp. 283–289.
- [15] S. Choi, K. Nam, and S. Jeong, Investigation on the pressure drop characteristics of cryocooler regenerators under oscillating low and pulsating pressure conditions, *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 44, No. 3, 2004, 203–310.
- [16] Y. Ju, , and Q. Shen, Comparative study of oscillating flow characteristics of cryocooler regenerator at low temperatures, *Front. Energy Power Eng.* Vol.3, No. 1, 2009, 80–84.
- [17] K. Nam, and S. Jeong, Measurement of cryogenic regenerator characteristics under oscillating low and pulsating pressure, *Cryogenics*, Vol. 42, No. 10, 2002, 575–581

- [18] S. Choi, K. Nam, and S. Jeong, Investigation on the pressure drop characteristics of cryocooler regenerators under oscillating low and pulsating pressure conditions, *Cryogenics*, Vol. 44, No. 3, 2004, 203–310
- [19] K. Nam, and S. Jeong, Novel flow analysis of regenerator under oscillating low with pulsating pressure, *Cryogenics*, Vol. 45, No. 5, 2005, 368–379
- [20] K. Nam, and S. Jeong, Investigation of oscillating low friction factor for cryocooler regenerator considering cryogenic temperature effect. *Cryogenics*, Vol. 45, No. 12, 2005, 733–738.

## Conclusion Générale

La présente étude a couvert plusieurs points pour aider à comprendre les performances mécanique et thermique des mousses d'aluminium fabriquées par la méthode de répliation (infiltration). Les résultats de cette étude pourraient aider à développer des régénérateurs à haute performance et à faible coût.

Nos principaux résultats sont résumés dans les points suivants :

### **I. Fabrication des échantillons :**

1- Trois particules de sel de tailles différentes (1-1,5 mm, 1,5-2,0 mm et 2,0-3,0 mm) ont été utilisées pour fabriquer de la mousse d'aluminium avec le procédé de répliation.

2- La méthode d'infiltration pour le processus de répliation a été appliquée

3- Différents échantillons (pores de 1 à 3,0 mm) ont été fabriqués sous diverses pressions d'infiltration pour étudier l'effet de la pression d'infiltration.

4- La pression d'infiltration optimale pour le gaz a été étudiée et la pression d'infiltration optimale pour trois tailles de pores (1-1,5 mm, 1,5-2,0 mm et 2,0-3,0 mm) ont été identifiées.

5- Etude des défauts de fabrication qui ont réduit les performances et les propriétés du produit de mousse d'aluminium.

6- Les échantillons prélevés sous une pression d'infiltration différente ont été testés et les résultats ont montré que les échantillons prélevés sous une pression d'infiltration plus faible présentaient des défauts.

7- Les échantillons manufacturés avaient une porosité moyenne de 65 %.

### **II. Les propriétés morphologiques**

La détermination de la taille moyenne des pores et de la densité des pores est toujours un problème pour les mousses métalliques, car la mousse métallique est une structure désordonnée complexe. Il est difficile de créer un motif géométrique à partir de mousse métallique. Les paramètres structurels des mousses d'aluminiums à cellules ouvertes fabriqués par la technique d'infiltration sont affectés par la disposition et la forme des particules de préformage. La structure des pores est simplifiée en une forme de tétrakaïdecaèdre composé de 8 hexagones réguliers et de 6 carrés.

### **III. Propriétés mécaniques**

Des tests de compression ont été effectués pour obtenir :

- 1- Les propriétés mécaniques ont montré que la forme de la courbe contrainte-déformation dépend de la porosité de la mousse.
- 2- La capacité d'absorption d'énergie des mousses diminue avec l'augmentation de la porosité.

### **IV. Propriétés Thermo-hydraulique :**

Cette étude a démontré que la porosité, les surfaces spécifiques et le diamètre des fibres de la mousse d'aluminium ont un effet sur le transfert de chaleur. Les performances de transfert de chaleur de la mousse d'aluminium à cellules ouvertes sont liées au contact ponctuel accru disponible entre la base chauffée et la mousse d'aluminium. En outre, une mousse à faible porosité a une chute de pression significativement plus élevée.

### **Perspectives**

Nous proposerons une étude métallurgique de la mousse métallique, c'est-à-dire une étude microstructurale pour relier les propriétés mécaniques et thermiques à la microstructure du matériau de base.