



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

**Filière : Génie Mécanique**

Spécialité : Mécanique énergétique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

Abd EL Fetah Megherbi

Sofiane Aourar

## Propriétés thermiques des mousses métalliques

---

### Jury :

Pr.	Mohamed said Chebbah	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Djamal Fites	MAB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Omar Hamdi	MAB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2023 /2024



# Remerciements

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

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

Je remercie le président de jury, Pr. **Mohamed said Chebbah**, Professeur à l'université de Mohamed Khider - Biskra, qui a accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie Dr. **Omar Hamdi**, docteur 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 master à mes parents, Qui ont consacré leur vie à notre confort et nous ont donné des doses d'espoir pour terminer le chemin du succès grâce à Dieu qui en a fait des raisons pour que nous atteignions notre objectif*

*Je le dédie aussi nos familles, frères et sœurs et collègues du chemin d'étude à nos amis qui ont partagé joie et tristesse avec nous merci à tous ceux qui nous ont soutenus je tiens à remercier tout le monde : La famille Aourar et Megherbi, Zouaoui, Rahmoune ; Lounici J, Ben Zafe J, Dr. Grine W, Boucherit C, Mehaoudj B, Zouaoui B, Mouaki Dadi Med, Lalmi A, Khamla y*

## ملخص

ان هذه الدراسة كرسست لصناعة رغوة الألومنيوم ذات الخلايا المفتوحة بطريقة التسلل وقد تم دراسة خصائصها الحرارية (أداء النقل الحراري) كما تم دراسة انتقال الحرارة عدديًا وتجريبيًا من خلال مقارنة بين مبادل مصنوع من الرغوة المعدنية ومبادل زعانف الالمنيوم. وقد أظهرت النتائج فرق الخصائص الحرارية بين رغوة وزعانف الالمنيوم.

**الكلمات المفتاحية:** رغوة الألومنيوم ذات الخلية المفتوحة، زعانف الالمنيوم، عملية التسلل، المسامية، الخصائص الحرارية، مبادل حراري.

## Abstract

This study was devoted to the manufacture of open-cell aluminum foam by infiltration method, and its thermal properties (thermal transfer performance) were studied and heat transfer was studied numerically and experimentally through a comparison between a metal foam exchanger and an aluminum fin exchanger. The results showed the difference in thermal properties between foam and aluminum blades.

**Keywords:** open-cell aluminum foam, aluminum blades, infiltration process, porosity, thermal properties, heat exchangers.

## Résumé

Cette étude a été consacrée à la fabrication de mousse d'aluminium à cellules ouvertes par méthode d'infiltration, et ses propriétés thermiques (performance de transfert thermique) ont été étudiées et le transfert de chaleur a été étudié numériquement et expérimentalement à travers une comparaison entre un échangeur à mousse métallique et un échangeur à ailettes en aluminium. Les résultats ont montré la différence de propriétés thermiques entre les ailettes en mousse et en aluminium.

**Mots-clés :** mousse d'aluminium à cellules ouvertes, ailette d'aluminium, processus d'infiltration, porosité, propriétés thermiques, échangeur de chaleur.

## 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 Mousses métalliques à pores ouverts :	6
1.3.2 Mousses métalliques à pores réticulées :	7
1.3.3 Mousses métalliques à pores fermés :	7
1.4 Grandeur caractéristique :	7
1.4.1 Porosité :	8
1.4.2 Surface spécifique :	9
1.4.3 Diamètre de pore :	9
1.4.4 Tortuosité :	10
1.4.5 Perméabilité :	10
1.4.6 Conductivité thermique effective (CTE) :	11
1.5 Propriétés et avantages des mousses :	12
1.6 D'application des mousses métalliques :	13
a) Echangeur de chaleur :	15
b) Purification de l'eau :	15
c) Applications biomédicales :	16
1.7 Procédés de fabrication de mousses métalliques :	16
1.7.1 Production de mousses par infiltration :	17
1.7.2 Voie en phase vapeur :	18
1.7.3 Voie métallurgie des poudres :	19
1.7.4 Voie électrodéposition :	20
1.7.5 Voie liquide :	21
1.7.6 Production de mousses métalliques par introduction de gaz dans un liquide :	23
1.8 Travaux de recherche :	23
1.8.1 Processus de réplcation (infiltration) :	23
1.8.2 Propriétés thermiques :	24
1.9 Conclusion :	31

## Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium

2-1 Introduction :	38
2.2 Étapes du protocole général de réplcation (infiltration) :	38
2.2.1 Les équipements et matériaux nécessaires :	38
▪ Préparation préforme :	39
2.2.2 Processus de Production des mousses :	41
▪ Les étapes du processus :	42
2.3 Mousse d'aluminium à cellules ouvertes produite :	43
2.4 Conclusion	45

## Chapitre 3 : Étude expérimentale des performances thermiques d'échangeur de chaleur

3.1 Introduction :	48
3.2 Méthode expérimentale :	48
3.2.1 Préparation d'échangeur mousse d'aluminium :	48
3.2.2 Préparation d'échangeur a ailette :	48
3.2.3 Appareils d'essai :	49
3.2.3 Procédure de mesure :	50
3.2.4 Arduino :	50
3.2.5 module MAX6675 :	51
▪ Liste des composants necessaires:	51
3.2.6 Schéma de connexion:	52
3.2.7 Code Arduino : Accéder aux lectures de température :	53
3.3 les calculs analytiques de performance thermique :	55
a. Echangeur a ailette.....	55
b. Echangeur de la mousse métallique .....	56
3.43.4 Discussion et Résultats.....	57
Références :	61

## Chapitre 4 - Conclusions et travaux futurs: .....62

4.1. Remarques finales.....	62
4.2. Fabrication des mousses.....	62
4.3 Mesure du transfert de chaleur :.....	62
4.4. Travail futur.....	62
4.4.1. Améliorer le système de thermométrie.....	63
4.4.2. Mesurer la conductivité thermique efficace.....	63

<b>4.4.3. Fabriquez davantage d'échantillons grâce à un mécanisme d'emballage amélioré.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4.4.. Fabrication des mousses avec différentes formes de pores.....</b>	<b>63</b>

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Matériaux naturels	4
1.2	Les principales applications des mousses métalliques	5
1.3	Une vue 2D de la mousse avec une caméra numérique	6
1.4	Mousses métalliques à pores ouverts	6
1.5	Mousses métalliques à pores réticulées	7
1.6	Mousses métalliques fermés	7
1.7	Présentation d'une mousse métallique	8
1.8	Schéma explicatif de la notion de tortuosité	10
1.9	Modèles de CTE en parallèle et en série	12
1.10	Applications des milieux cellulaires	13
1.11	Echangeur de chaleur	15
1.12	Un filtre pour purification de l'eau	16
1.13	Les différentes techniques utilisées pour fabriquer des matériaux métalliques cellulaires	17
1.14	Procédé de fabrication des mousses d'aluminium par écoulement d'infiltration	18
1.15	Échantillon « Incofoam » fabriqué par procédé au nickel-carbonyle	19
1.16	Étape de fabrication des mousses métalliques par agent moussant	20
1.17	Sandwich aluminium/mousse d'aluminium	20
1.18	Schéma de la méthode d'électrodéposition	21
1.19	Mousse de nickel préparée par électro-position	21
1.20	Schéma de la méthode d'infiltration	22
1.21	Caractéristiques de la structure de la mousse métallique	22
1.22	Mise en œuvre d'une mousse d'Al par injection	23
1.23	Schémas du système de production	24
1.24	Diagramme schématique d'une technique comparative d'état stable utilisée pour les mesures de conductivité thermique efficace	26
1.25	Montage expérimental de Sertkaya et al [61].	29

2.1	Plate-forme de fabrication de mousse	38
2.2	Moules de forme cylindrique et bloc rectangulaire	39
2.3	L'ordre des tamis utilisés pour séparer la taille des particules	40
2.4	Poudre de NaCl formée de particules de taille qui varie entre 1,5 - 2,0 mm	41
2.5	Étapes principales de production du mousse d'aluminium à cellule ouvert	41
2.6	Surface latérale des échantillons	44
2.7	Trois échantillons des mousses d'aluminium préparées par un moule rectangulaire	44
3.1	échangeur mousse d'aluminium	48
3.2	échangeur a ailette	49
3.3	Appareils d'essai	49
3.4	Le système experimental	50
3.5	Une carte Arduino Uno avec ses connecteurs.	50
3.6	MAX6675 Module Avec Thermocouple Type K	51
3.7	Câble de connexion M/F Jumper	52
3.8	Arduino Uno R3 avec câble USB	52
3.9	Schéma	53
3.10	Graphiques à barres montrant une comparaison entre les performances thermiques d'un échangeur à mousse métallique (1) et d'un échangeur à ailette (2)	58
3.11	Graphiques à barres montrant une comparaison entre les coefficients de transfert de chaleur d'un échangeur à mousse métallique (1) et d'un échangeur à ailette (2)	59

### Liste des Tableaux :

	Titre	page
1.1	Porosité des matériaux poreux.	9
1.2	Perméabilité des matériaux poreux	11
2.1	Principales propriétés physiques de l'aluminium.	39
2.2	Propriétés de sel	40
2.3	Caractérisation d'échantillon élaboré	43
3.1	Propriétés thermiques et températures des fluides (Échangeur a ailette)	55
3.2	Propriétés thermiques et températures des fluides (Échangeur de la mousse métallique)	56
3.3	Les résultats d'étude	58

## Nomenclatur

$d_f$	Diamètre de fibre	mm
$d_p$	Diamètre du pore	mm
$S_p$	Surface spécifique	$m^{-1}$
$L_e$	Longueur du chemin parcouru	m
$L$	Longueur du chemin réel	m
$V_p$	volume de vide (pore)	$m^3$
$V_t$	volume total	$m^3$
$\rho_g$	La densité du matériau qui forme la structure solide du milieu poreux	$Kg. m^{-3}$
$\rho_m$	La densité globale du milieu poreux	$Kg. m^{-3}$
$\mu$	la viscosité	Pa.s
$T$	Température	$^{\circ}C$
$Q$	Flux thermique	Watt
$k_a$	Conductivité thermique d'air	$W.m^{-1}. k^{-1}$
$k_f$	Conductivité thermique de fluide	$W.m^{-1}. k^{-1}$
$k_{eff}$	Conductivité thermique effective (CTE)	$W.m^{-1}. k^{-1}$
$k_s$	Conductivité thermique du solide	$W.m^{-1}. k^{-1}$
$h_{conv}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W.m^{-2}. k^{-1}$
$K$	Perméabilité	$m^2$
$\varphi$	Porosité	
$\tau$	Tortuosité	
$\nabla R$	Gradient de pression	$Pa. m^{-1}$
$\varepsilon$	Efficacité	
$\Delta T_{ML}$	Différence de température moyenne logarithmique	$^{\circ}C$

## ❖ Introduction générale :

Les tendances actuelles dans le domaine des matériaux s'inscrivent dans deux directions principales. D'une part, des efforts sont déployés pour concevoir des structures plus légères afin de réduire la consommation d'énergie tout en améliorant les performances mécaniques et la durabilité. D'autre part, les matériaux multifonctionnels, tels que les métaux poreux ou les mousses métalliques, qui combinent de fortes propriétés mécaniques et des fonctionnalités spécifiques suscitent un intérêt croissant. Ces matériaux ont une large gamme d'applications dans l'automobile, l'aérospatiale, les échangeurs de chaleur et les réservoirs de carburant. La mousse métallique est un matériau poreux et spongieux qui ressemble à une éponge, un os ou un corail. La structure poreuse varie de 40 % à 95 %. Jusqu'à maintenant, la mousse métallique est principalement fabriquée à partir de matériaux tels que l'aluminium, l'alliage d'aluminium (Al), le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et le magnésium (Mg). [1,2]

Les cellules fermées et ouvertes sont les deux types de structures cellulaires des mousses métalliques [2]. Les parois métalliques entourent les pores des structures à cellules fermées, tandis que les pores des structures à cellules ouvertes ont des pores interconnectés. Tôles à cellules ouvertes, un type de matériau relatif nouvelle, gagnent en intérêt dans de nombreux domaines de recherche.

Les propriétés structurelles et thermiques de ces matériaux sont très intéressantes. Ces mousses métalliques ont une construction légère et rapport surface/volume élevé qui augmente la turbulence et améliore le mélange des flux. Ces propriétés le rendent idéal pour une variété d'applications de transfert de chaleur [3,4].

Les mousses métalliques en fonction d'alliages à base d'aluminium sont les plus courantes sur le marché en raison de leur faible densité, de leur ductilité élevée, de leur conductivité thermique élevée et de leur faible coût [2]. Les propriétés de ces mousses métalliques en alliage d'aluminium varient uniquement ça dépend la taille des pores, le développement et la caractérisation de ces mousses restent un sujet de recherche. C'est dans ce contexte que nous avons réalisé cette mémoire de master.

La fabrication de mousse d'aluminium métallique et ses nombreuses applications possibles font l'objet de cette étude. Cette thèse se concentrera ensuite sur caractéristiques distincte : les caractéristiques énergétiques (propriétés de transfert thermique).

Le travail est présenté en trois chapitres principaux :

1. • Dans le premier chapitre, nous présenterons les mousses métalliques, ainsi que leurs caractéristiques et le principe de fabrication. Actuellement, nous pouvons classer les différentes techniques en fonction de l'état dans lequel le métal est traité. Il y a quatre "familles" définies [5], chacune correspondant à l'un des états de la matière. Pour cette étude, la méthode de production est la coulée sous vide ou l'infiltration, qui peut être classée comme la mousse liquide.

2. • Le deuxième chapitre contient la méthode utilisée et les étapes expérimentales et les dispositifs utilisés pour fabriquer de la mousse métallique à pores ouverts.

3. • L'expérience menée dans le troisième chapitre a été présentée pour étudier les caractéristiques de transfert thermique de la mousse d'aluminium à travers une comparaison entre un échangeur de chaleur à base des ailettes un autre échangeur à base de mousse d'aluminium. De plus, nous présentons des analyses numériques et expérimentales des échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes utilisant un transfert de chaleur unidimensionnel. De plus, une étude a comparé les résultats expérimentaux et numériques.

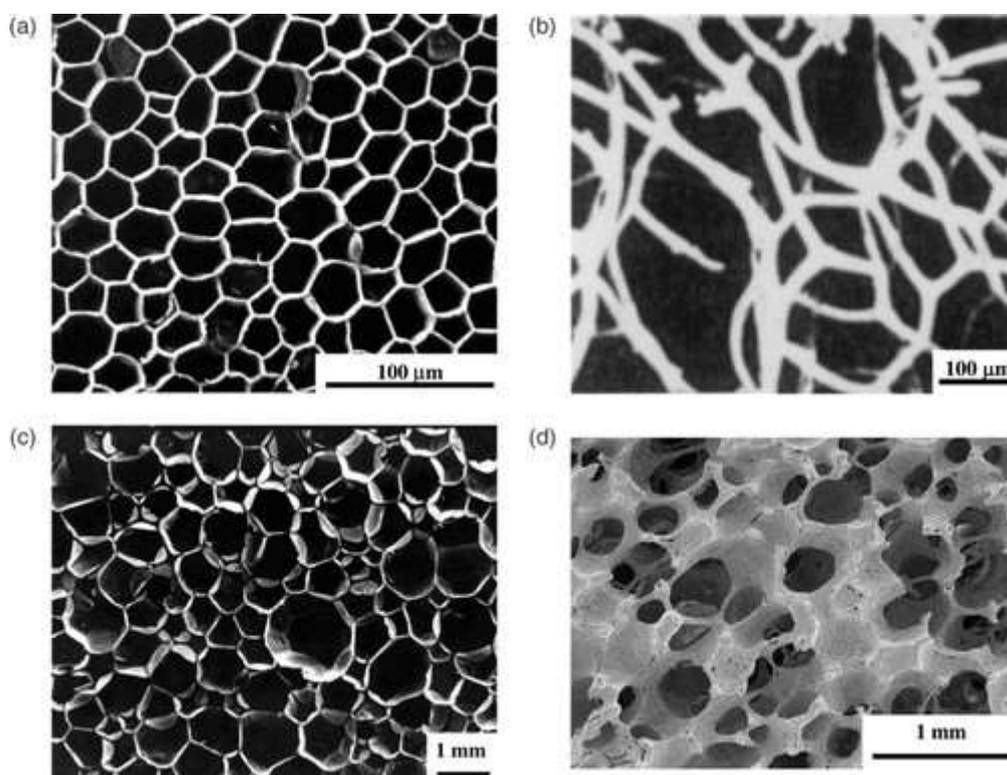
4 • Enfin, nous terminons notre travail avec une conclusion générale et travaux future qui résumant l'ensemble des résultats obtenus

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur les Mousses Métalliques**

## 1.1 Introduction :

Les mousses métalliques se composent d'un ensemble de cellules vides enclore de parois ou d'arêtes solides, pouvant avoir jusqu'à 95 % de vide [7]. Un milieu poreux est un solide complexe qui renferme des cavités. Ces cavités ont la capacité de communiquer entre elles et de renfermer une ou plusieurs phases fluides qui peuvent circuler. Elle est composée de pores reliés entre eux sous forme de mousse ouverte ou isolée, ce qui crée une mousse à cellule fermée, une cellule séparée qui renferme le gaz à l'intérieur [8]. Les matériaux cellulaires tels que le bois, les os, le corail, le liège et d'autres matériaux de construction biologique ont une structure hiérarchique cellulaire dans la nature. (Fig. 1.1).

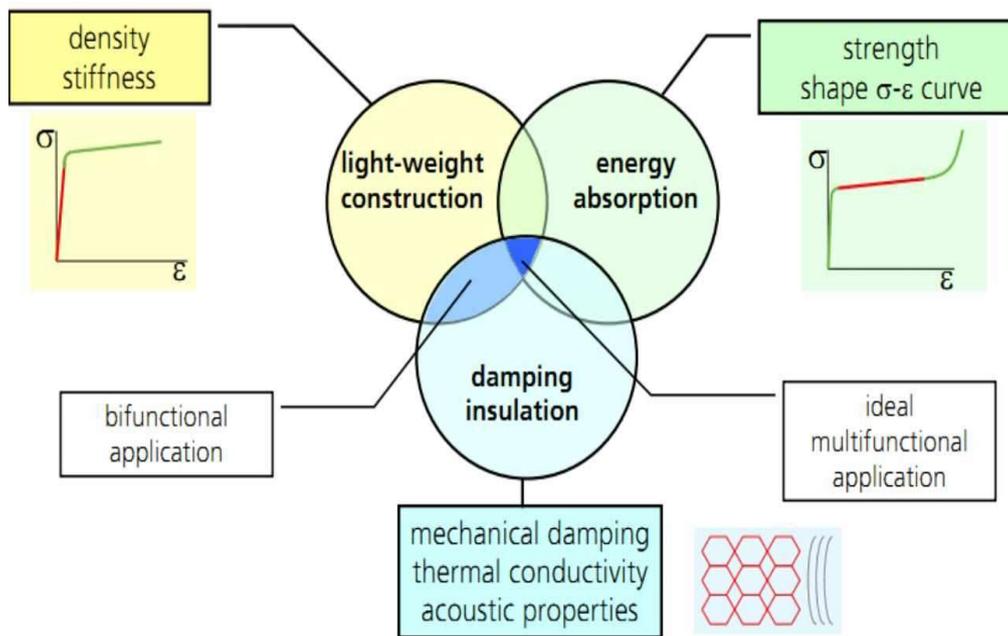


**Figure 1.1 : Matériaux naturels : (a) liège, (b) éponge, (c) bois balsa, (d) os [9].**

Les matériaux tels que les polymères, les verres, les céramiques et même certains matériaux peuvent présenter une mousse. Actuellement, les mousses synthétiques et polymériques jouent un rôle essentiel dans les cellules car elles sont utilisées dans de nombreux domaines technologiques [10]. Leurs caractéristiques intéressantes, comme leur rigidité élevée,

leur résistance aux incendies, leur atténuation acoustique et leur facilité de réutilisation, sont le fruit de leurs combinaisons remarquables (Fig. 1.2).

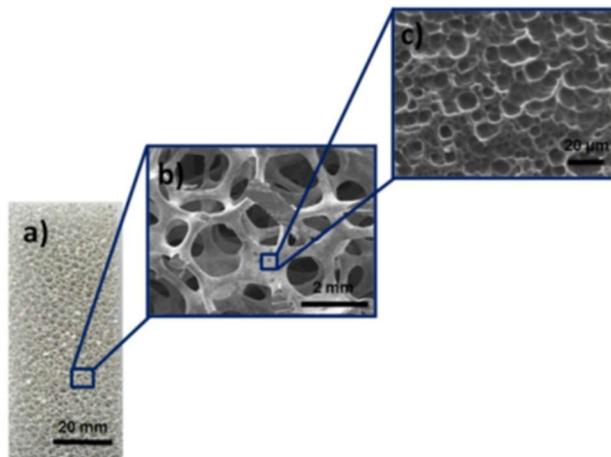
Les mousses en métal représentent un nouveau matériau extrêmement prometteur. Les premières expériences de fabrication de mousse datent des années 1960. L'intérêt pour cette catégorie de matériaux n'était pas encore assez important pour lancer une production industrielle à cette époque. Au cours des dix dernières années, les avancées dans la recherche et le développement des mousses métalliques ont été notables en ce qui concerne la qualité des produits et les coûts de production. Plus précisément, l'aluminium et ses alliages sont fréquemment employés en tant que matériaux ignifugés 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 [5].**

## **1.2 Description microstructurale :**

La fig (1.3) montre que ces matériaux avaient généralement une morphologie qui pouvait être caractérisée à trois échelles différentes. L'échelle microscopique concerne la microstructure du matériau constitutif du matériau cellulaire, l'échelle mésoscopique concerne la distribution des cellules, leur taille et leur forme, et l'échelle macroscopique décrit les grandeurs globales du matériau, telles que sa densité, son anisotropie et son caractère cellulaire (ouvert ou fermé) [6].



**Figure 1.3 : (a) Une vue 2D de la mousse avec une résolution de 20 mm**

**(b) Le même image avec une résolution de 2 mm**

**(c) La même image avec une résolution de 20  $\mu\text{m}$ . [12]**

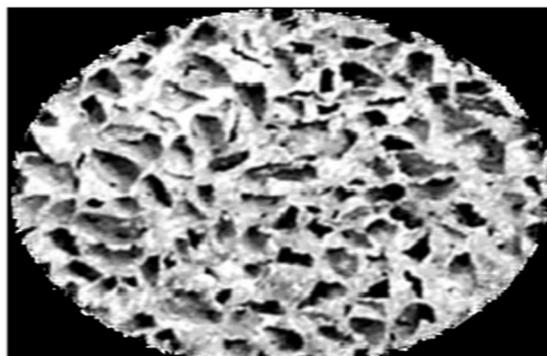
### **1.3 Les différents types de mousse :**

Les mousses métalliques sont des matériaux cellulaires macroscopiquement caractérisés par leurs structures topologiques (cellules ouvertes et fermées), leur densité relative, leur taille et leur forme et leur anisotropie. Ensuite, on distingue trois catégories de mousses :

1. Les mousses métalliques à pores ouverts.
2. Les mousses métalliques réticulées.
3. Les mousses métalliques à pores fermées.

#### **1.3.1 Mousses métalliques à pores ouverts :**

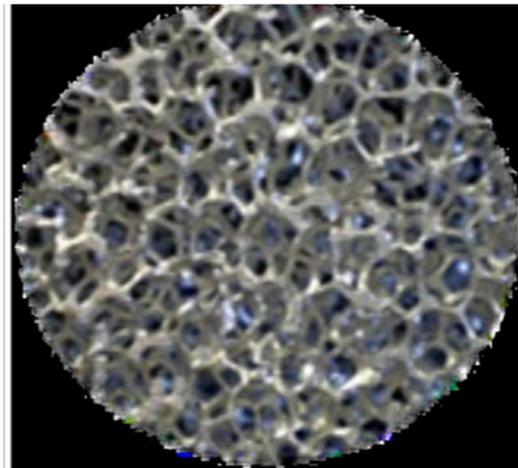
Les cellules connectées sont présentes dans les mousses à pores ouverts. En général, la structure géométrique d'une mousse ouverte est plus complexe que celle d'une mousse à cellules fermées. Fig. (1.4). [6]



**Figure 1.4 : Mousses métalliques à pores ouverts.**

### 1.3.2 Mousses métalliques à pores réticulées :

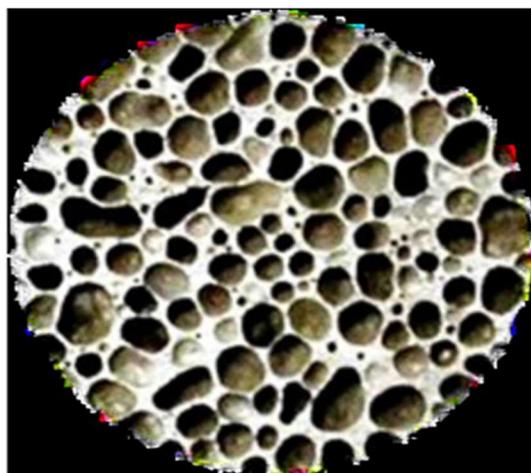
Les mousses métalliques réticulées présentent des réticulations au lieu de pores, ce qui les rapproche des mousses métalliques à pores ouverts. Les mousses les plus fines peuvent même être visibles au travers. De cette façon, ces mousses métalliques sont les plus flexibles de ces composants cellulaires. Fig. (1.5) [6].



**Figure 1.5: Mousses métalliques réticulées.**

### 1.3.3 Mousses métalliques à pores fermés :

Ils se distinguent par leur structure sphérique séparée par des parois souvent épaisses ; (Fig1.6).



**Figure 1.6 : Mousses métalliques à pores fermés.**

## 1.4 Grandeur caractéristique :

Un certain nombre de grandeurs moyennes, géométriques ou statiques caractérisent les milieux poreux ou les mousses métalliques. On peut distinguer :

**1.4.1 Porosité :**

La porosité est le principal élément qui caractérise un milieu poreux [13]. Elle est calculée en fonction du rapport entre le volume des pores (vides) et le volume total du milieu :

On a alors [15, 16] :

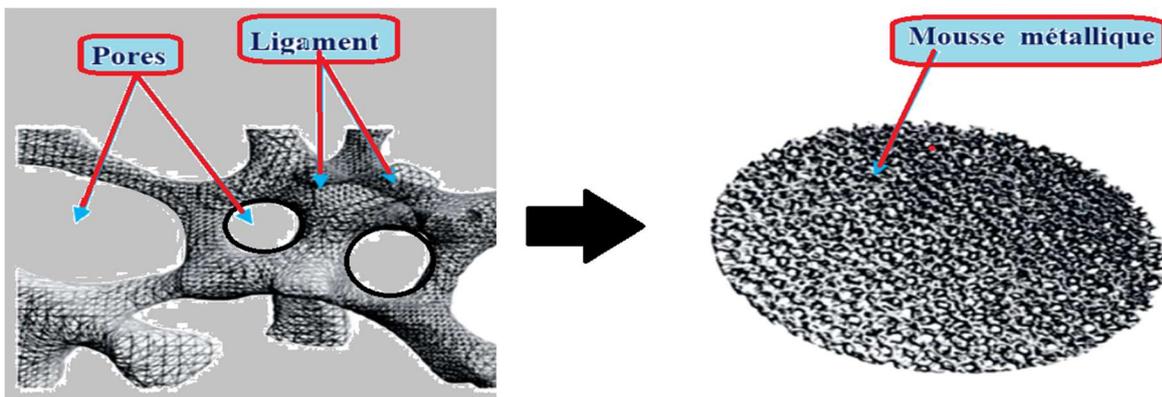
$$\varphi = \frac{V_p}{V_t} \tag{1-1}$$

De 0 (solides pleins) à 1 (volume totalement vide), elle oscille. En règle générale, la distribution et la forme des vides (pores) à travers la matrice poreuse ne sont pas uniformes [14].

Une autre approche basée sur les mesures de densité est basée sur une simple relation [17] :

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_m} \tag{1-2}$$

La Masse volumique  $\rho_g$  du matériau qui forme la structure solide du milieu poreux est proportionnelle à la masse volumique  $\rho_m$  globale du milieu poreux. Pour calculer le coefficient.  $\rho_g$  Il existe de nombreuses méthodes différentes, telles que la prise en compte des paramètres géométriques et la pesée de l'échantillon, ou encore la substitution volumétrique (cette méthode consiste à immerger l'échantillon dans un liquide non mouillant, comme l'mercure, qui ne pénètre pas dans le milieu poreux). etc



**Figure 1.7 : Présentation d'une mousse métallique à pores ouvertes.**

Tableau 1.1 représente la porosité des matériaux poreux [21].

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

#### 1.4.2 Surface spécifique :

Les surfaces particulières des milieux poreux qui ressemblent à la mousse sont particulièrement importantes pour les efficacités et la conception des réacteurs et des échangeurs de chaleur, car leurs valeurs élevées améliorent le transfert de chaleur et la masse [18]. Si l'on suppose que les surfaces des interfaces sont parfaitement flatteuses la surface totale des interfaces solides pores par volume brut de mousse est la définition la plus largement utilisée pour la surface spécifique des structures de mousse [19].

Elle s'exprime comme suit [21, 20] :

$$S_p = \frac{6(1-\varphi)}{d_p} \quad (1.3)$$

Avec  $d_p$ : diamètre de pore

#### 1.4.3 Diamètre de pore :

En général, la notion de « taille de pore » est très difficile à définir. S'il est facile de délimiter les cellules à l'aide de l'observation visuelle, leur mesure précise demande l'utilisation de techniques 3D spécifiques. Le diamètre des pores correspond à la taille moyenne des cellules de la mousse. [22]

Il a été calculé le diamètre des pores  $d_p$  en étudiant le nombre de pores dans une longueur spécifique de mousse métallique. Il est possible de le calculer en utilisant les équations suivantes [66] :

Elle s'exprime comme suit :

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

Toutefois, la numérotation est une technique très basique et peu précise, mais elle est l'une des approches de normalisation chez les fabricants et les enquêteurs [67].

On peut calculer le diamètre de la fibre  $d_f$  en utilisant l'équation suivante [68] :

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

**1.4.4 Tortuosité :**

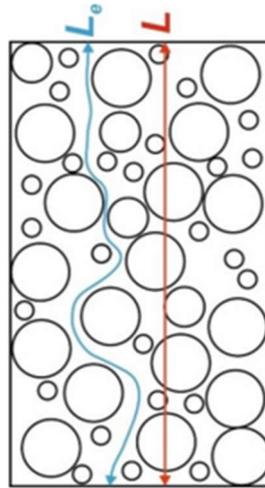
Tortuosité est une caractéristique inhérente au cadre solide en ce qui concerne l'espace poreux et la géométrie [26], et elle joue un rôle crucial dans la prédiction des vitesses de phase d'un matériau poreux. La tortuosité correspond au rapport entre la longueur réelle du chemin et la longueur directe du chemin [27], comme la montre la fig (1.8). On la détermine selon l'expression suivante :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (1.6)$$

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

Inayat et ses collègues [28] ont suggéré ce qui suit afin de déterminer la tortuosité :

$$\tau = 1 + 1.21751 - \frac{1 - 0.971(1-\varphi)^{0.5}}{(1-\varphi)^{0.5}} \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \quad (1.7)$$



**Figure 1.8 : Schéma explicatif de la notion de tortuosité [27].**

**1.4.5 Perméabilité :**

Henry Darcy a introduit le concept de perméabilité  $K$  [ $m^2$ ] pour la première fois en 1856, en se basant sur des tests en laboratoire sur le débit volumétrique et la variation de pression à travers un

## Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques

lit de sable. En outre, il est crucial de comprendre la perméabilité afin de concevoir et d'exploiter efficacement des systèmes industriels à haute performance. Dans la majorité des œuvres littéraires. [6], La loi de Darcy est présentée sous le titre :

$$K = -\frac{\mu}{\nabla R} u \quad (1.8)$$

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

Par exemple, on peut trouver la perméabilité pour divers matériaux dans le Tableau 1.2.

**Tableau 1.2** représente la perméabilité des matériaux poreux [21].

<b>Matériaux</b>	<b>Perméabilité <math>K</math> (cm<sup>2</sup>)</b>
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	$2,9 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-7}$

### **I.4.6 Conductivité thermique effective (CTE) :**

La conductivité thermique est un facteur qui joue un rôle crucial dans la création de matériaux à pores ouverts utilisés dans des 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 dans les environnements [5]. La conductivité thermique effective est déterminée à l'aide de deux modèles analytiques simples. Wiener [29] a élaboré un modèle simple en prenant en compte les deux phases soit en parallèle, soit en série l'une avec l'autre (Fig.1.9).

#### **a) Modèle en série :**

Dans cette configuration, le flux de chaleur passe successivement par la phase fluide et la phase solide. Ainsi, la conductivité thermique effective correspond à la somme des conductivités thermiques dans chaque phase. On la donne de la manière suivante [6] :

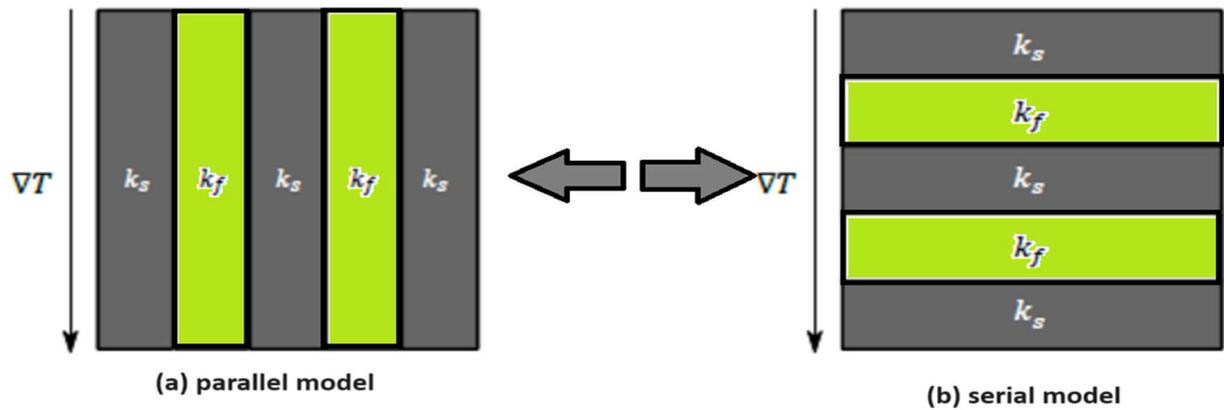
$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{(1-\varphi)}{k_s} + \frac{\varphi}{k_f} \quad (1.7)$$

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 [6].

**b) Modèle en parallèle :**

Dans ce modèle, la chaleur traverse simultanément les deux phases fluide et solide, ce qui entraîne une conductivité thermique effective qui est la moyenne des deux conductivités. Elle est présentée de la manière suivante [6] :

$$k_{eff} = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_f \tag{1.8}$$



**Figure 1.9 : Modèles de CTE en parallèle et en série [29].**

**1.5 Propriétés et avantages des mousses :**

Les mousses métalliques ont suscité l'intérêt des scientifiques à travers le monde depuis des décennies en raison de leur unique combinaison d'avantages. Elles constituent une catégorie de matériaux qui offre aux fabricants un potentiel considérable pour les structures légères, l'absorption d'énergie et la gestion thermique. En effet, elles se distinguent par les avantages suivants [1, 30]

1. Les matériaux métalliques possèdent une capacité remarquable à absorber l'énergie à pression quasi constante
2. Les mousses métalliques sont de faible densité et présentent une résistance à la rupture élevée.
3. Ces mousses sont légères, mais elles ont également une porosité élevée (>95%) qui réduit les pertes de charge.

## Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques

4. Un niveau de surface spécifique très élevé, ce qui leur permet d'évacuer une grande quantité de chaleur;
5. L'un des moyens de circulation non linéaires qui favorisent un mélange très efficace;
6. Une excellente caractéristique acoustique (coefficient de perte dans la plage des fréquences auditées), ce qui entraîne une diminution du son;
7. Une variété variée de mousses en ce qui concerne leur porosité et leurs matériaux (cuivre, nickel, chrome, aluminium...) pour différentes applications (allant de - 100°C à 400°C) ;
8. Un aspect novateur.
9. Un matériau qui peut être recyclé;
10. La capacité des mousses à cellules ouvertes avec une taille de pores régulée est de filtrer les gaz et les liquides à des températures élevées.

### 1.6 D'application des mousses métalliques :

Dans cette section, nous exposons quelques-unes des multiples applications où l'utilisation de la mousse métallique apporte une certaine valeur ajoutée aux systèmes qui l'emploient. Étant donné le caractère relativement jeune du matériau, la recherche des différents usages possibles du matériau est un domaine de recherche à part entière qui contribue chaque jour à l'expansion du domaine d'application des "mousses métalliques ». Ainsi, la liste des applications mentionnées ci-dessous ne peut être complète [22,23].

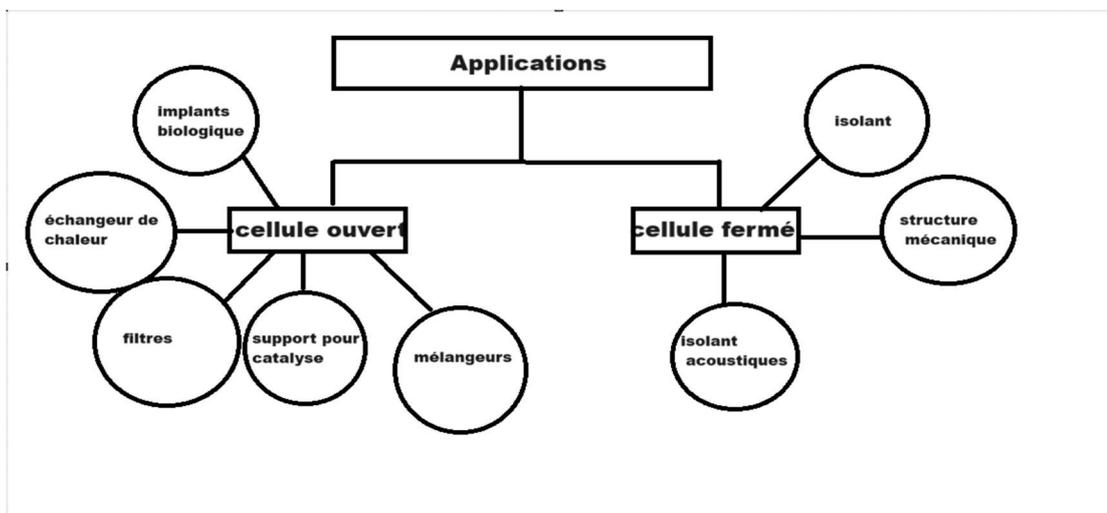


Figure 1.10 : les différentes utilisations des milieux cellulaires.

## Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques

Cela explique pourquoi elles sont employées dans de multiples domaines industriels tels que [5] :

- a) Secteur de l'automobile ;
- b) Matériel sportif ;
- c) Secteur de l'aérospatiale ;
- d) Secteur ferroviaire ;
- e) Fabrique de machines ;
- f) La création de navires ;
- g) Secteur du bâtiment ;
- h) Secteur biomédical.

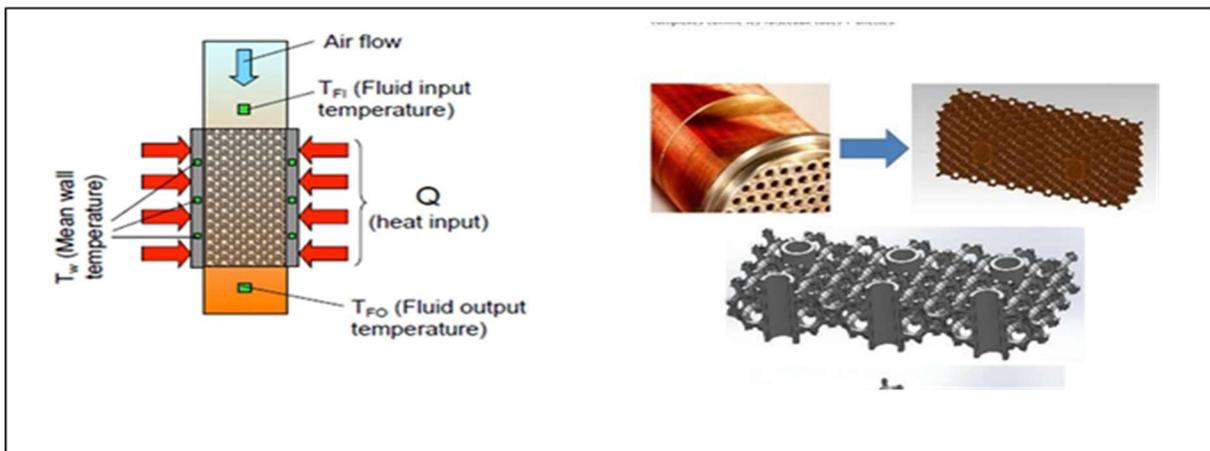
Il existe une variété d'applications fonctionnelles disponibles sur le marché à partir de mousses métalliques [5, 31].

- 1) Gestion et échange de liquides
- 2) Les dispositifs contenant un catalyseur ;
- 3) Le dispositif antibuée ;
- 4) L'adaptateur pour les batteries ;
- 5) Les électrodes utilisées dans les citernes de carburant ;
- 6) L'évaporateur ;
- 7) Les filtres. (Observez la fig 1.12) ;
- 8) Le détecteur de feu ;
- 9) Les Redresseurs et les diviseurs de débit (pour les canalisations de gaz et de liquides, avec une importance particulière pour le processus de refroidissement des fibres) ;
- 10) Les machines de refroidissement et l'échangeur de chaleur (voir la fig 1.13)
- 11) Les supprimeurs de pression pour les vannes de contrôle, qu'ils soient sous forme de garnitures ou d'inserts ;

- 12) Les combustibles gazeux pré-mélangés ;
- 13) Les atomiseurs rotatifs utilisés pour une atomisation extrêmement fine ;
- 14) Le pare-étincelles et l'arrêt-flammes (moteurs diesel) ;
- 15) Les dispositifs de silence et de régulation acoustique (d'échappement, restrictifs, atténuateurs);
- 16) Les absorptions et les défecteurs d'ultrasons, ainsi que de nombreux autres.

**a) Echangeur de chaleur :**

La présence d'échangeurs compacts permet de limiter l'encombrement, le poids et le coût des systèmes d'échange thermique. Ceux-ci se retrouvent de plus en plus dans tous les domaines de l'industrie, en particulier dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile, de l'aéronautique et de la cryogénie. Le métal présente une conductivité thermique élevée, des caractéristiques de mélange de la structure et un rapport performant entre la perte de pression et la surface d'échange, ce qui constitue un avantage pour ce type d'utilisation [23].



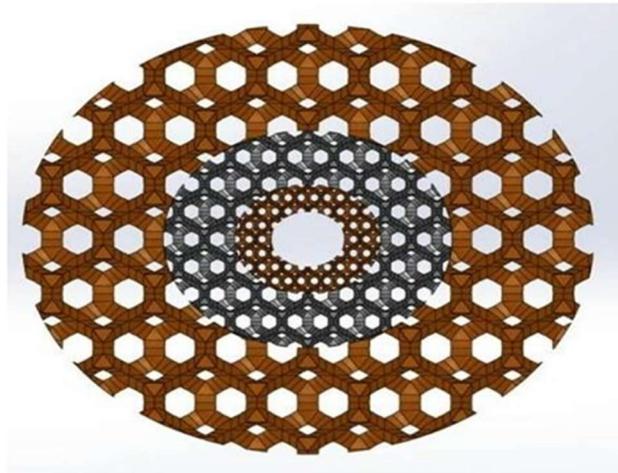
**Figure 1.11 : Echangeurs de chaleurs [22].**

**b) Purification de l'eau :**

L'emploi de mousses de "cuivre-argent" pour purifier l'eau représente une autre voie vers le développement. Le contact entre le liquide et les métaux a la capacité d'agir contre les bactéries et les algues contenant le fluide (comme les légionnelles, les streptocoques...). Les mousses de ce type sont particulièrement intéressantes pour tous les circuits d'eau qui exigent une qualité d'eau impeccable : stations thermales, eau potable, tours de refroidissement...

Selon des tests préliminaires réalisés en laboratoire, il a été démontré que des mousses dont la

phase solide est constituée d'un mélange de cuivre et d'argent présentent des caractéristiques enviables pour purifier l'eau en termes d'écologie, de coûts et de convivialité [22,23].



**Figure 1.12: Un filtre pour purification de l'eau [22].**

### **c) Applications biomédicales :**

Récemment, un procédé de production de mousses métalliques a été développé par l'institut des matériaux industriels (IMI). C'est un matériau dont la structure est ouverte qui convient parfaitement à la production d'implants ou de systèmes d'ancrage poreux.

En réalité, les caractéristiques et les structures des matériaux obtenus sont semblables à celles des ossements.

Grâce à leur structure, leur résistance à la corrosion, leur compatibilité avec la peau et leurs caractéristiques mécaniques, ces mousses de titane sont un matériau privilégié pour la création d'implants et de systèmes d'ancrage pour des applications orthopédiques et dentaires [22].

### **1.7 Procédés de fabrication de mousses métalliques :**

Différentes méthodes permettent de produire des matériaux métalliques cellulaires. Quelques techniques ressemblent aux méthodes employées pour rendre les liquides aqueux ou les polymères mousseux, tandis que d'autres sont spécifiquement élaborées pour exploiter les propriétés spécifiques des métaux.

Il est possible de classer les diverses méthodes en fonction de l'état dans lequel le métal est traité. Quatre catégories de processus sont définies, résumées dans la fig 1.13, et chacune correspond à l'un des états de la matière [5] :

1- en transformant le métal en liquide.

2- de la poudre métallique solide.

3- à partir d'une vapeur de métal ou de composés métalliques gazeux.

4- en utilisant une solution d'ions métalliques

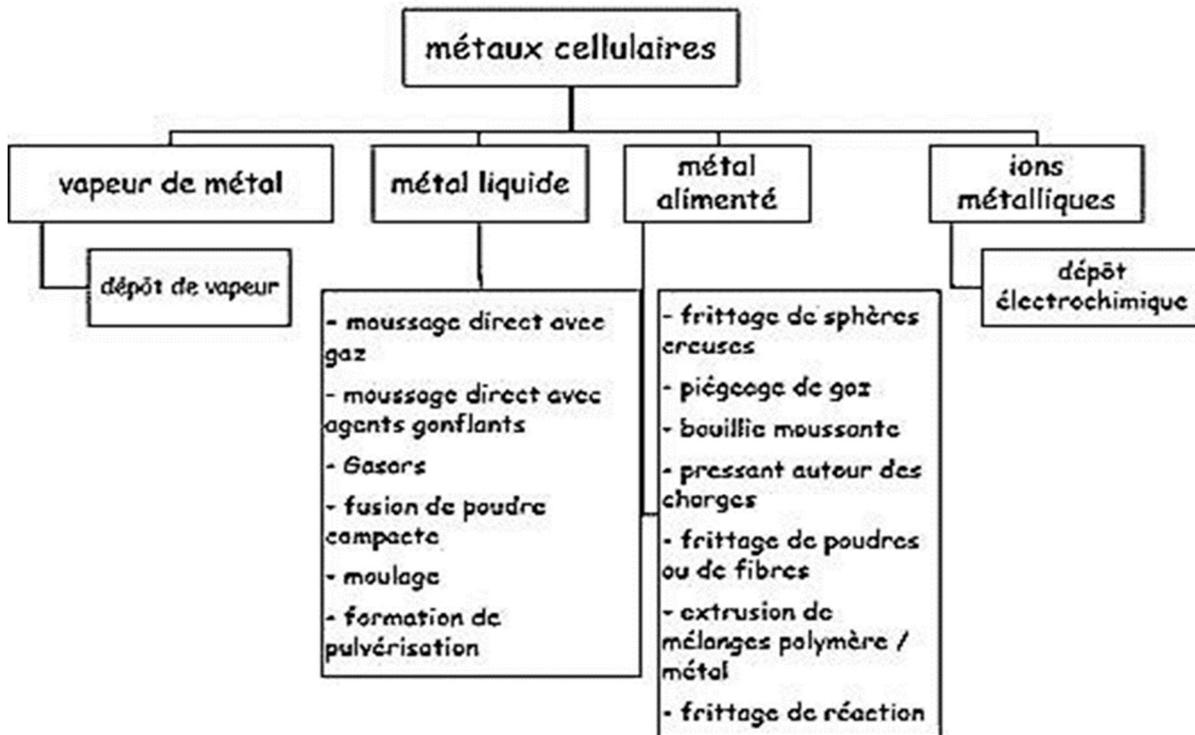
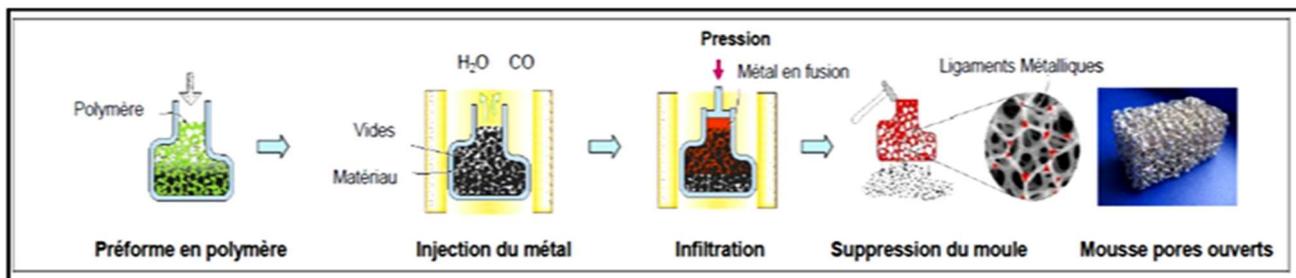


Figure 1.13 : Les différentes techniques utilisées pour fabriquer des matériaux métalliques cellulaires [22].

**Production de mousses par infiltration :**

Pour fabriquer une mousse, il est nécessaire d'utiliser au moins deux composants chimiques : un gaz et une poudre, ou un sel et une poudre. Le premier composant est utilisé pour créer les bulles, c'est-à-dire le vide, tandis que le second est utilisé pour former les murs, également appelés arrêtes des cellules.

Dans les méthodes d'infiltration d'une préforme, des granules ou des billes, appelées « précurseurs », sont insérées dans le moule d'une pièce cellulaire prédéterminée. Ils sont regroupés en vrac, ce qui donne naissance à ce qu'on appelle la "préforme". N'occupant pas l'intégralité de l'espace, ces précurseurs créent un réseau de porosités qui sera ensuite infiltré par le métal afin de se former. Après que la pièce s'est solidifiée, on en extrait les précurseurs afin d'obtenir un matériau granulaire.[23]

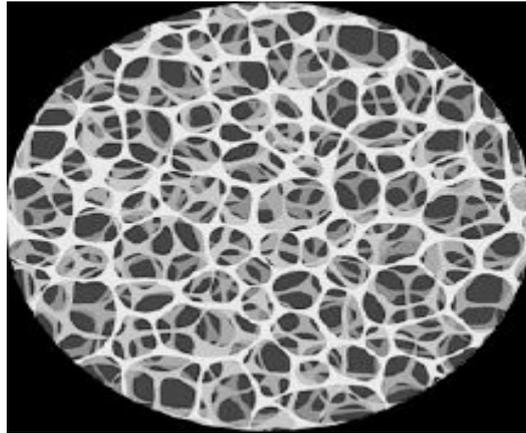


**Figure 1.14 : Procédé de fabrication des mousses d'aluminium par écoulement d'infiltration [25].**

### **Voie en phase vapeur :**

Il est également possible de produire des mousses métalliques à partir de métal gazeux. La vapeur métallique peut être générée dans une chambre à vide et peut se condenser sur le précurseur froid. La surface du précurseur polymère est recouverte par le métal condensé qui crée une pellicule d'une épaisseur spécifique qui varie en fonction de la densité de la vapeur et du temps d'exposition. On peut réaliser ce processus en utilisant le dépôt de vapeur [5,6]. Pour réaliser des mousses de nickel, il est possible d'utiliser la méthode du carbonyle de nickel, qui est extrêmement efficace pour enrober le précurseur de nickel à des températures extrêmement basses. On obtient du nickel carbonyle en réaction  $\text{Ni} + 4\text{CO} \rightarrow \text{Ni}(\text{CO})_4$  [33,6]. Lorsque le nickel carbonyle est chauffé à des températures supérieures à 120 °C, il se transforme en nickel et en carbone monoxyde. Il est donc possible de recouvrir le précurseur du polymère en permettant l'écoulement d'un flux de nickel carbonyle à des températures similaires. Lorsque la décomposition se produit, le nickel se retrouve accumulé sur le précurseur, formant ainsi un revêtement métallique. Il est possible de maintenir le polymère à la température de décomposition nécessaire du carbonyle en utilisant un chauffage infrarouge [34,35,6]. Une fois refroidi, il est possible de retirer le polymère en utilisant un traitement thermique ou chimique, et on obtient le même type de matériau avec des entretoises creuses, similaire à celui utilisé dans le galvanique.

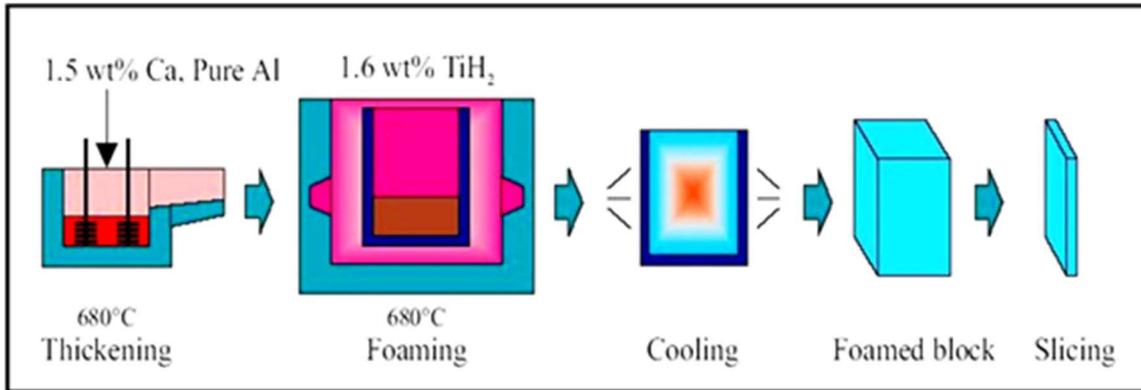
Les feuilles minces de mousse de nickel fabriquées dans cette méthode sont commercialement commercialisées sous le nom d'« Incofoam » [36,6], avec une épaisseur maximale de 3,3 mm Une densité moyenne oscille entre 0,2 et 0,6 g/cm<sup>3</sup>, avec une pureté des matériaux de 99,97 % Ni et des forces de traction d'environ 0,6 MPa. La représentation de « Incofoam » est présentée dans la fig (1.15).



**Figure 1.15: Échantillon « Incofoam » fabriqué par procédé au nickel-carbonyle (15 ppi) [24]**

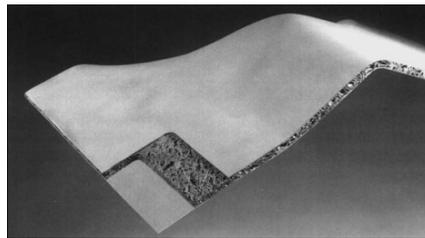
**Voie métallurgie des poudres :**

Selon la fig (1.16), le processus implique d'abord de combiner un agent moussant (généralement du  $TiH_2$ ) avec de l'aluminium sous forme de pulvérisation, puis de renforcer l'ensemble en produit semi-fini en le compactant. On peut mettre en forme ce produit semi-fini en utilisant les méthodes traditionnelles de mise en forme à froid. Le moussage se produit lorsque l'ensemble est chauffé au-dessus du solide de l'aluminium, ce qui entraîne la décomposition de l'agent moussant à haute température et le dégagement de gaz. La réaction génère une mousse qui est attachée au moule, qui est généralement composé d'une feuille d'aluminium. Le principal bénéfice de cette méthode réside dans la possibilité de fabriquer des produits presque finis avec une grande liberté de forme et surtout une bonne adhérence de la mousse à son enveloppe. Le composite obtenu présente de très bonnes caractéristiques particulières. Cependant, il est essentiel d'examiner attentivement la forme de la pièce pour assurer un refroidissement homogène. En effet, une vitesse de solidification plus lente dans une partie de la pièce entraîne une porosité accrue. Le paradoxe de cette méthode réside dans le fait qu'en conception, une partie massive est généralement associée à une partie plus sollicitée de la pièce [32]. Ainsi, cette méthode entraîne la fabrication de pièces fragilisées dans les endroits les plus sollicités. D'après la référence [37], cette méthode pourrait permettre de produire un matériau poreux avec une porosité allant jusqu'à 95%.



**Figure 1.16 : Etapes de fabrication des mousses métalliques par agent moussant [25].**

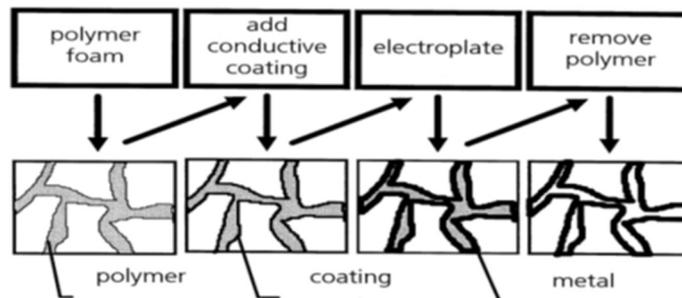
Un sandwich en aluminium et en mousse d'aluminium de grande taille a été créé dans le cadre d'une collaboration entre le constructeur automobile allemand Karmann et l'Institut Fraunhofer. On peut observer l'une de ces pièces dans la fig (1.17). Ces sandwichs ont une forme en 3D, pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres de long et environ 1 mètre de large [5].



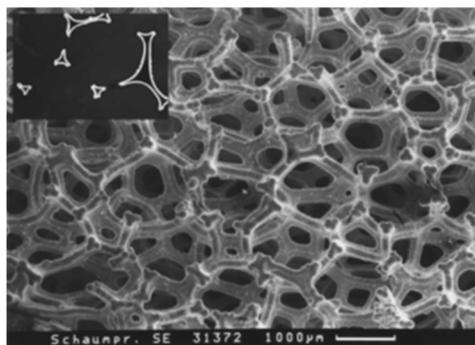
**Figure 1.17 : Sandwich aluminium/mousse d'aluminium (épaisseur 10 mm) [5].**

### **Voie électrodéposition :**

La méthode d'électrodéposition a été développée au cours des vingt dernières années pour substituer la mousse de polymère par du métal, comme le montre le schéma présenté dans la fig (1.18). Il est nécessaire de réaliser cette méthode dans l'électrolyte en utilisant des ions métalliques. En utilisant le courant électrique, il serait possible de déposer les ions métalliques sur la mousse de polymère avec le revêtement conducteur. Finalement, on élimine le polymère présent dans la mousse métallique en chauffant l'échantillon [38]. On pourrait obtenir des mousses de nickel et de cuivre en utilisant la méthode d'électrodéposition, qui présentent une connectivité des pores optimale et une structure uniforme.



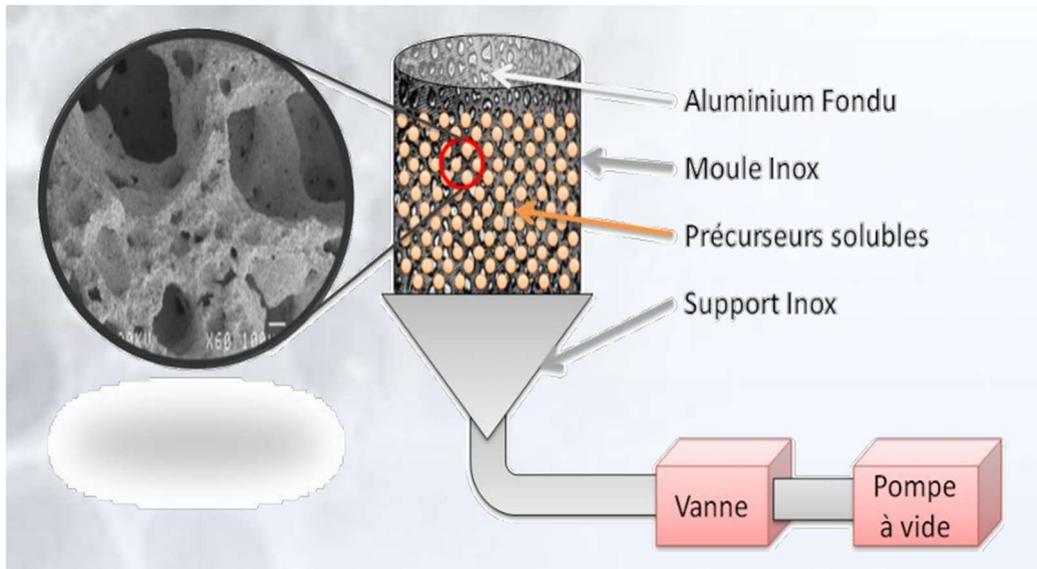
**Figure 1.18 : Schéma de la méthode d'électrodéposition [4]**



**Figure 1.19 : Mousse de nickel préparée par électro-position [4]**

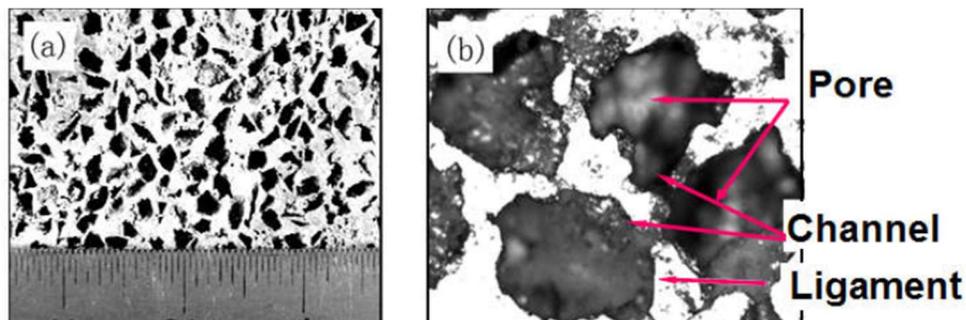
#### **Voie liquide :**

La méthode de préparation traditionnelle pour la mousse métallique à cellules ouvertes est l'infiltration, qui permet de préparer la mousse d'aluminium, de magnésium et de zinc. Cette approche offre de multiples bénéfices, tels qu'un processus simple, un coût abordable et une bonne maîtrise de la taille et de la porosité [39]. On utilise toujours la particule de sel comme préforme pour créer la structure de la cellule ouverte [40]. La fig (1.20) illustre le schéma schématique du processus d'infiltration. L'injection, l'infiltration et la solidification sont les processus clés. En premier lieu, il est nécessaire de préchauffer le moule rempli de sels afin de préserver la viscosité du métal fondu lors de l'infiltration. Étant donné que le métal fondu et le sel ne sont pas mouillés, la tension superficielle pourrait entraver le remplissage total de l'espace entre les particules de sel par le liquide. Ainsi, une fois que le métal fondu a été introduit dans le moule, il est nécessaire de faire immédiatement circuler la pression afin de faire le métal fondu rempli dans les espaces entre la préforme. Il est possible que la pression soit négative ou positive. Une fois solidifié, l'échantillon sera placé dans de l'eau afin de retirer la préforme. Par conséquent, il est possible d'obtenir une structure interconnectée en mousse métallique.



**Figure 1.20 : Schéma de la méthode d'infiltration [47]**

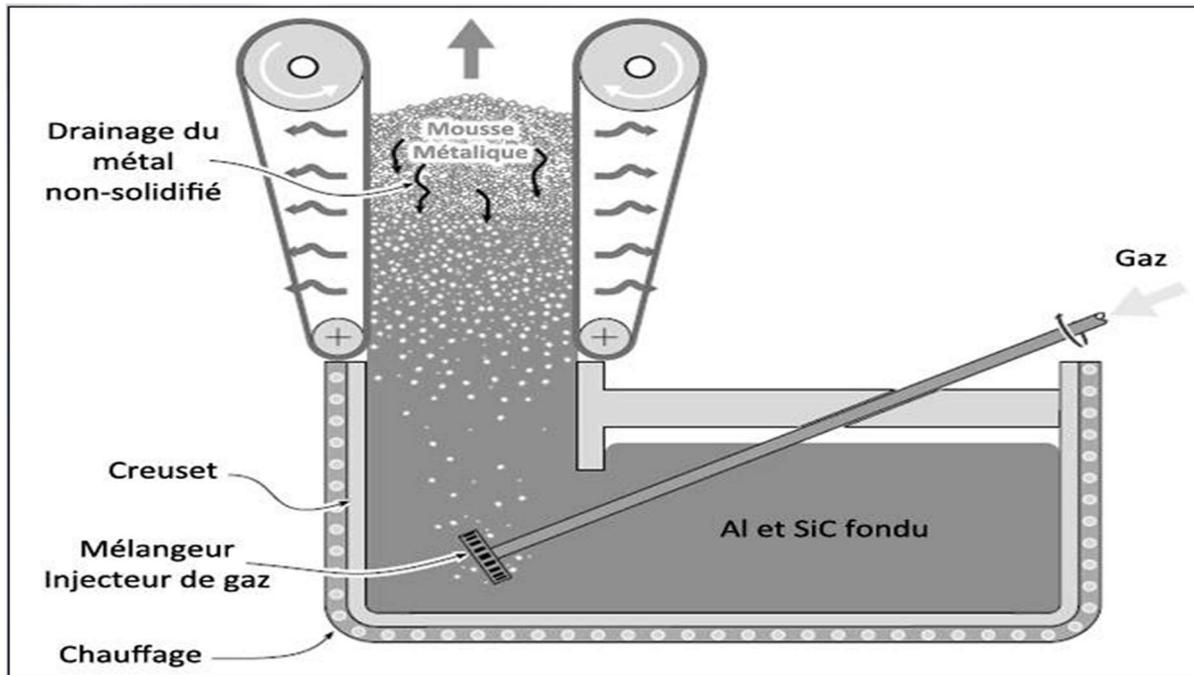
La fig (1.21) présente les caractéristiques de structure (les pores et les grands ligaments) de la mousse métallique fabriquée par infiltration. Il est possible de constater que la composition des pores repose sur la structure de la particule. La mousse métallique à cellules ouvertes est constituée de pores, de grands ligaments métalliques et de canaux. En général, ce genre de mousse métallique présente une porosité modérée et présente de bonnes caractéristiques mécaniques [46].



**Figure 1.21 : Caractéristiques de la structure de la mousse métallique préparée par la méthode d'infiltration (a) macrostructure (b) microstructure [45].**

**Production de mousses métalliques par introduction de gaz dans un liquide :**

Une mousse (liquide) est un mélange instable d'une phase gazeuse, qui représente plus de 74% du volume total, dans une phase liquide, sous forme de cellules polyédriques dans leur ensemble [22].



**Figure I.22 : Mise en œuvre d'une mousse AL par injection de gaz [47].**

**I.8 Travaux de recherche :**

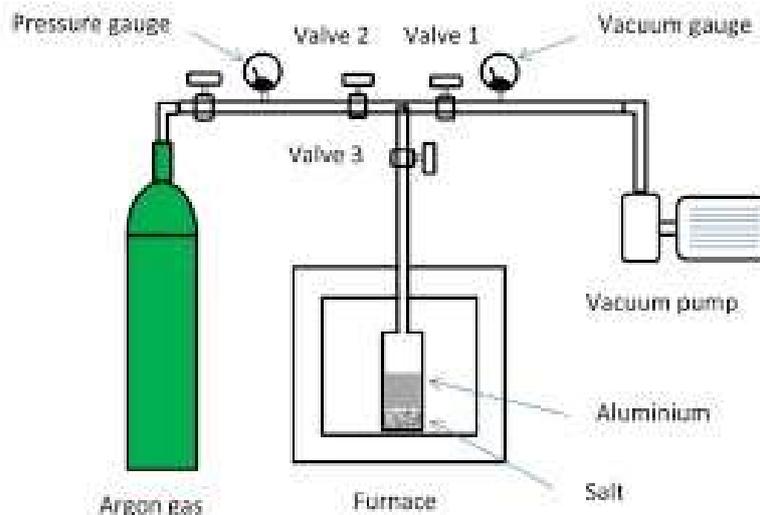
Dans ce qui suit, nous allons exposer un résumé de quelques recherches menées sur les techniques de fabrication simples des mousses d'aluminium à cellules ouvertes, ainsi que sur les caractéristiques mécaniques et thermo-physiques de ces matériaux. De nombreuses études ont utilisé des essais de compression pour déterminer les propriétés mécaniques, tandis que des études expérimentales, théoriques et numériques ont été menées sur les échangeurs thermiques de mousses d'aluminium. [6].

**1.8.1 Processus de réplcation (infiltration) :**

On a largement employé la méthode de réplcation (infiltration) en utilisant des particules de chlorure de sodium (sel) comme support d'espace pour produire des mousses d'aluminium [5, 43]. Il est possible de modifier la taille des pores et la porosité en modifiant la préforme et la pression d'infiltration [43].

Une des études intéressantes de cette méthode est celle menée par Erardo et ses collègues [44], qui met en évidence la simplicité, le coût bas et la simplicité du processus de fabrication. Une étude plus approfondie a été menée et deux nouvelles méthodes ont été développées : l'infiltration de gaz uniquement et l'infiltration mécanique. La méthode du gaz seul a été choisie en raison de sa capacité à être reproduite et de sa qualité. Les échantillons ont été préparés en utilisant différentes pressions d'infiltration pour Des mousses avec des pores de 1 à 1,1 mm, 1,4-1,7 mm et 2,0-2,36 mm

En tout, on a produit neuf mousses métalliques en aluminium pour les tests thermiques et sous pression. Les mousses produites présentaient trois dimensions de pores distinctes : 1-1,1 mm (connus sous le nom de petits échantillons), 1,4-1,7 mm (connus sous le nom d'échantillons intermédiaires) et 2-2,36 mm (connus sous le nom de grands échantillons). Les mousses produites présentaient une porosité variant de 0,62 à 0,65. La fig 1.23 présente le schéma de la méthode des Erardo et al [44].



**Figure 1.23 : Schémas du système de production [45].**

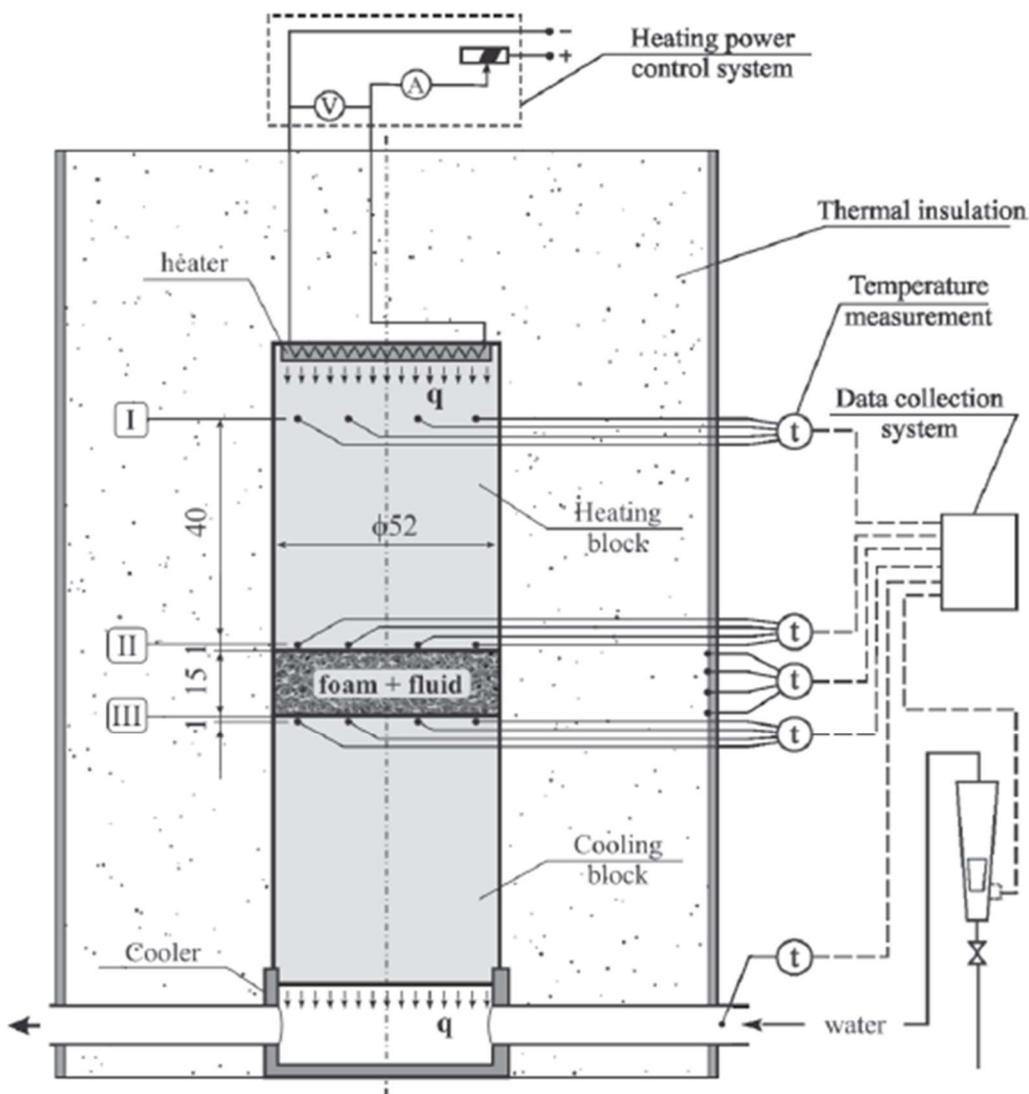
### 1.8.2 Propriétés thermiques :

En raison de leurs structures poreuses, les mousses métalliques à cellules ouvertes sont également perçues comme l'un des matériaux les plus efficaces pour améliorer le taux de transfert de chaleur et sont des choix intéressants pour les échangeurs de chaleur [46,48]. Les caractéristiques thermiques comprennent les caractéristiques telles que la conductivité thermique, le coefficient de transfert de chaleur, la chaleur spécifique, et ainsi de suite [46,49].

**1.8.2.1 Corrélation empirique de la conductivité thermique effective (CTE) :**

Le paramètre thermo-physique crucial est la conductivité thermique efficace (CTE) des mousses à cellules ouvertes, qui peut avoir un impact sur le transfert de chaleur par conduction dans le matériau [46,50]. C'est pourquoi certains modèles ont été utilisés afin de calculer la CTE de la mousse métallique. À titre d'exemple, les modèles suggérés par Bhattacharya et ses collègues [51] ont employé l'eau et l'air en tant que phases fluides dans les mousses d'aluminium. Une corrélation empirique a été suggérée entre le CTE et la porosité. En revanche, Boomsma et Poulikakos [52] ont suggéré un modèle (CTE) qui repose sur une structure cellulaire idéalisée en trois dimensions de mousse métallique en se basant sur la loi de Fourier sur la transmission de la chaleur. Selon Abuserwal et ses collègues [53], une corrélation empirique a été suggérée pour évaluer CTE. Ils ont conclu que l'augmentation de la porosité entraîne une diminution de la CTE, mais ils n'ont pas identifié l'impact de la taille des pores. Selon Belcher et ses collègues [54], un polynôme de corrélation analytique de deuxième ordre a été suggéré pour évaluer la CTE en fonction de la porosité. Wang et ses collègues [55] ont suggéré un modèle basé sur l'élaboration de polynômes de deuxième ordre avec différentes structures de mousse d'aluminium.

La fig 1.24 présente un schéma de l'appareil employé pour évaluer la conductivité thermique réelle. On utilise souvent l'état d'équilibre comparatif pour mesurer la CTE des matériaux poreux [56, 57, 58].



**Figure 1.24 : Diagramme schématique d'une technique comparative d'état stable utilisée pour les mesures de conductivité thermique efficace [55].**

Dans la majorité des expériences, ils ont utilisé un disque en mousse d'aluminium pour l'échantillon d'essai. Ce disque avait un diamètre de 52 mm et une hauteur de 15 mm, et il a été placé entre deux blocs cylindriques en aluminium de même diamètre que le disque. Les blocs ont été fixés aux filaments squelettiques en utilisant une colle époxy-aluminium pour diminuer la résistance au transfert de chaleur sur les surfaces de contact entre l'échantillon et le bloc. L'un des blocs était équipé d'un système de chauffage électrique sur sa surface extérieure, tandis que l'autre bloc était refroidi à l'eau sur sa surface extérieure. Un disque en forme de réchauffeur de résistance plate a été utilisé comme élément chauffant pour le bloc. L'élément d'isolation en polyuréthane a été utilisé pour intégrer le réchauffeur et le refroidisseur afin de réduire au maximum les pertes de chaleur pour l'environnement. On a percé des trous dans les blocs et on

## *Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques*

Il y a installé 12 thermocouples du type K d'un diamètre de 1 mm. Les enregistrements de température à trois niveaux du banc d'essai ont été effectués à leur aide. [55]

On a repéré quatre thermocouples aux deux surfaces de contact entre l'échantillon et le bloc (niveau II et III). On a placé 4 thermocouples à une distance de 51 mm de l'échantillon de mousse (niveau I) [55].

On a placé les thermocouples à diverses distances de l'axe vertical du support afin d'analyser le profil de répartition de la température sur la partie transversale. En outre, il y avait 4 thermocouples disposés à l'extérieur de l'isolant - les mesures de ces points ont permis de mesurer les pertes de chaleur [55].

Des modules de mesure multicanaux spécifiques ont été connectés aux thermocouples, qui ont été fournis avec des systèmes de référence pour stabiliser et corriger la température. Un système de collecte de données comprenait ces modules et un ordinateur, offrant ainsi la possibilité d'observer en temps réel les variations de température à divers endroits et d'enregistrer les résultats sur un support de stockage de données. Avant les essais, le système de mesure de la température a été calibré. Les performances de tous les thermocouples ont été éprouvées à deux niveaux de température, à savoir lors de la fonte de la glace et lors de l'ébullition de l'eau. Suite à l'étalonnage, tous les thermo-éléments indiquaient une valeur de 0,2 K par rapport à la température d'étalonnage. Les mesures ont été effectuées à quatre différentes températures [55].

Concernant la manière dont la chaleur est transférée, le chauffage a été initialement appliqué vers le haut, puis vers le bas. Après avoir ajusté la puissance de l'élément chauffant, la température a été altérée. Pour ajuster la puissance de chauffage, nous avons modifié la tension d'alimentation du réchauffeur et nous avons vérifié les résultats en utilisant un voltmètre et un ampèremètre intégrés dans le système d'alimentation [55].

Après avoir stabilisé les conditions de transfert de chaleur, on a enregistré les valeurs de température pour tous les points de mesure du système. Selon leur hypothèse, le système a été stabilisé lorsque les variations de température entre les niveaux I, II et III ont été constantes pendant au moins 15 minutes. Étant donné que le banc d'essai avait une grande capacité calorifique, chaque mesure a nécessité plus de 90 minutes de temps en pratique. Chaque système à mousse liquide a subi deux séries de mesures, avec un profil de température croissant et une série avec un profil de température décroissant [55].

L'eau de refroidissement a assuré une évacuation homogène de la chaleur du système, avec une température et un débit constants. Un débitmètre électronique a été employé par la

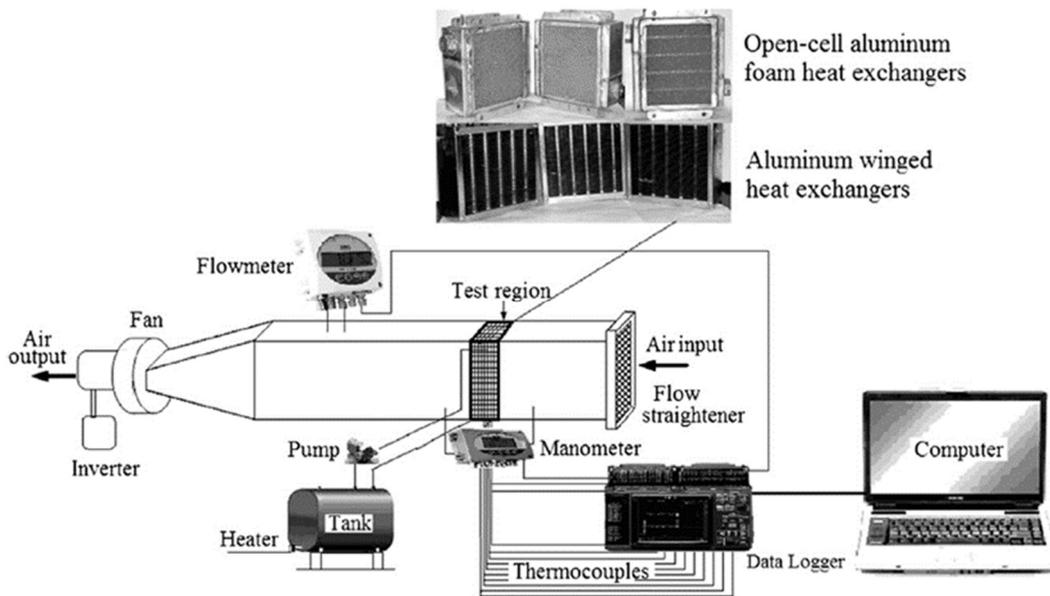
turbine pour mesurer le débit d'eau, tandis qu'un thermocouple a été utilisé pour surveiller la température à l'entrée d'eau de l'élément de refroidissement [55].

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

L'étude se concentrait principalement sur le transfert de chaleur par convection forcée pour différentes mousses métalliques à cellules ouvertes à haute porosité. Les recherches ci-dessous abordent certains des travaux les plus performants dans l'analyse du transfert de chaleur convective forcée. Selon Boomsma et ses collègues [46], une recherche expérimentale a été menée sur la compression d'une mousse d'aluminium et sa transformation en échangeur de chaleur. On visait à évaluer leur efficacité et à les comparer à un autre échangeur de chaleur de même taille conçu pour une utilisation similaire dans le secteur industriel. On constata que la mousse en métal a une réduction de près de la moitié de la résistance thermique. L'étude menée par Bhattacharya et Mahajan [51] a examiné le transfert de chaleur par convection forcée sur des mousses en aluminium avec des porosités de 0,9 et 5-20 PPI (pores par inch). Ils ont démontré que le coefficient de transfert de chaleur augmente à mesure que le nombre de d'ailette augmente, en raison de l'augmentation de la surface spécifique disponible pour le transfert de chaleur. Cependant, cette augmentation a entraîné une importante baisse de la pression. Le flux de convection thermique uniforme à travers un canal rectangulaire avec des mousses d'aluminium avec divers PPI a été examiné par Kurtabas et Celik [59]. Selon eux, les mousses à haute densité poreuse ont une amélioration significative du transfert de chaleur et ont constaté une augmentation proportionnelle du nombre de Nusselt avec PPI. Une étude expérimentale et numérique a été réalisée par Calmidi et Mahajan [60] afin d'évaluer la dissipation thermique dans les mousses métalliques à haute porosité (0,89–0,97). Il a été observé que les combinaisons de mousse et d'air présentent une faible dispersion thermique en raison de la conductivité élevée de la matrice solide. Toutefois, les données démontrent que la répartition thermique peut être significative dans les mélanges de mousse et d'eau.

Selon Sertkaya et ses collègues [61], une étude expérimentale a été réalisée sur la performance thermique des trois échangeurs à ailettes d'aluminium combinés à trois échangeurs en mousse d'aluminium à cellules ouvertes. Les échangeurs de chaleur fabriqués en mousse présentaient une porosité de 0,9, des PPI de 10, 20, 30 et des dimensions de 200x200x100 mm. Les échangeurs de chaleur en aluminium à ailettes présentaient des dimensions similaires à celles des échangeurs de chaleur en mousse, avec des distances de 1,6, 3,2 et 4,8 mm entre les ailettes. Les données expérimentales ont été employées afin d'analyser l'efficacité thermique en fonction de la vitesse, la perte de pression en fonction de la vitesse, le

facteur de frottement en fonction du nombre de Reynolds et le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Nusselt. Il y avait environ un nombre de Reynolds utilisé lors des essais  $5 \times 10^3 - 9 \times 10^4$ . Il a été observé que, pour les deux types d'échangeurs de chaleur, lorsque la vitesse du frigorigène augmente, l'efficacité diminue et la perte de pression augmente. L'efficacité était accrue lorsque les nombres de Reynolds étaient plus bas. Ils ont également remarqué que les échangeurs de chaleur en aluminium à ailettes transmettent beaucoup plus de chaleur que ceux en mousse d'aluminium. La fig (1.25) présente la configuration expérimentale employée dans leurs recherches.



**Figure 1.25 : Montage expérimental de Sertkaya et al [61].**

### 1.8.2.3 Transfert de chaleur combiné dans les mousses d'aluminium :

Selon les chercheurs, la mousse de métal à cellules ouvertes est perçue comme un matériau prometteur pour les échangeurs de chaleur [46,48], car sa surface poreuse pourrait jouer un rôle dans le processus de transfert de chaleur. Lorsqu'on compare la mousse métallique aux ailettes métalliques classiques, elle présente une densité de surface comparable et une résistance mécanique plus élevée [62]. Dans cette partie, nous abordons les caractéristiques thermiques des mousses métalliques, notamment la transmission de chaleur et la convection. L'étude du transfert de chaleur mixte (conduction-convection) dans les échangeurs de chaleur est essentielle, ainsi que la conductivité thermique dans le côté solide et la convection thermique dans le côté fluide. Selon Writz [63], un modèle semi-empirique de transfert de chaleur a été suggéré pour une paroi en mousse mince. Selon le modèle, le réfrigérant était supposé circuler uniquement à travers la paroi poreuse et être conduit uniquement dans la

## *Chapitre 1 : Généralité sur les Mousses Métalliques*

matrice poreuse. La matrice poreuse avait une surface de transfert de chaleur supérieure à celle de la bande d'ailettes pour le même volume de l'échangeur de chaleur. En se basant sur une analyse de la transmission de chaleur par conduction-convection. Selon Jefferson et ses collègues [64], une synthèse des recherches récentes sur les mousses métalliques à cellules ouvertes avec des pores d'environ 1 mm a été présentée afin d'améliorer le transfert de chaleur et la conductivité thermique effective. De plus, ils ont également présenté un résumé des études sur le transfert de chaleur par convection forcée à l'aide d'air et d'eau. Il a été observé que lorsque la température est répartie de manière homogène, cela facilite le transfert de chaleur par conduction/convection et améliore la diffusivité thermique du mélange métal/mousse, sont l'objectif principal pour optimiser le transfert de chaleur dans différentes utilisations.

Dans leur étude [65], Dukhan et ses collègues ont examiné un modèle de transfert de chaleur unidimensionnel en mousse métallique à cellules ouvertes avec une porosité de 0,9 et 10 PPI. Dans cette étude, ils ont proposé un modèle d'hypothèse unidimensionnel qui combine la conduction dans les ligaments et la convection vers le liquide de refroidissement dans les pores. Dans leurs recherches, ils ont évité d'utiliser un modèle 3D complexe de flux et de transfert de chaleur dans la mousse. La température au long de la mousse a connu une baisse exponentielle à mesure que la base chauffée était éloignée. Leur expérience directe sur un échantillon de mousse d'aluminium mince de porosité 0,9 et 10 PPI a été réalisée pour vérifier le modèle d'hypothèse unidimensionnelle. D'après les résultats, on a constaté une diminution exponentielle de la température au long de la mousse à mesure que la distance de la base chauffée augmentait. L'augmentation du nombre de Reynolds a également augmenté le transfert de chaleur jusqu'à une limite donnée, ce qui a permis un bon accord entre les modèles.

### **1.9 Conclusion :**

Ce chapitre a fourni une vision globale des matériaux cellulaires, leurs caractéristiques, leurs utilisations et les diverses méthodes de fabrication qui peuvent être classées en fonction de l'état de traitement du métal et qui peuvent influencer directement ses propriétés mécaniques et thermiques. En même temps, il est crucial de ne pas sous-estimer les dimensions spécifiques, notamment la porosité, la surface spécifique et la densité, car la majorité des études et recherches mécaniques ou thermiques reposent sur ces dimensions physiques. De cette façon, l'objectif de cette étude est d'optimiser la fabrication des mousses d'aluminium en améliorant la structure de la mousse métallique.

Étant donné toutes les recherches menées sur l'amélioration du transfert de chaleur en utilisant des mousses métalliques. Selon les résultats expérimentaux, il est évident que les performances de la mousse métallique seront une option pratique pour de nombreuses applications industrielles. Grâce à cela, de nombreux chercheurs peuvent approfondir leurs connaissances sur la manipulation des mousses métalliques dans différentes utilisations de climatisation, de transfert de chaleur par conduction/convection et de résistance structurale des mousses métalliques. Il ressort des résultats que la compréhension des caractéristiques est encore limitée et que l'analyse de l'impact de la porosité et de la densité des pores reste incertaine. De plus, les recherches en ligne sur les mousses métalliques ont employé une approche théorique sophistiquée. Et n'ont pas donné 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] [https://www.researchgate.net/figure/Applications-Fields-for-Aluminium-Foams-Davies-et-al-1983\\_fig1\\_342864263](https://www.researchgate.net/figure/Applications-Fields-for-Aluminium-Foams-Davies-et-al-1983_fig1_342864263) la date : 20/03/2024 à 11 :30
- [6] DJ. Fites, Elaboration et caractérisation d'une mousse métallique (Doctoral dissertation, mohamed khider university biskra).
- [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] [https://www.google.com/imgres?imgurl=https://www.tandfonline.com/cms/asset/75f6495e-54ef-4684b9b10ea1dade9c66/tphl\\_a\\_330368\\_o\\_f0001g.gif&tbnid=BIf74BUQ3u80mM&vet=1&imgrefurl=https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500830802302014&docid=Yh9x7oPbXjTOHM&w=500&h=384&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m5/2&kgs=9f287f6d6b18316d&shem=abme,trie](https://www.google.com/imgres?imgurl=https://www.tandfonline.com/cms/asset/75f6495e-54ef-4684b9b10ea1dade9c66/tphl_a_330368_o_f0001g.gif&tbnid=BIf74BUQ3u80mM&vet=1&imgrefurl=https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500830802302014&docid=Yh9x7oPbXjTOHM&w=500&h=384&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m5/2&kgs=9f287f6d6b18316d&shem=abme,trie) la date : 23/03/2024 à 9:30
- [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] M. Benmerkhi, Transfert de chaleur et de matière dans un canal rempli partiellement d'une matière poreuse. Mémoire de Magistère, Spécialité énergétique, option photothermique, Université Mentouri Constantine, 2007.

- [14] I.Solmus, Numerical investigation of heat transfer and fluid flow behaviors of a block type graphite foam heat sink inserted in a rectangular channel , Elsevier Applied Thermal Engineering 78 (2015) 605-615.
- [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] 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] J. Bear, Dynamics of fluids in porous media, New York, NY: Dover Publications, 1988.
- [22] J. P. Bonnet, Phénomènes de transport dans les mousses métalliques : approche expérimentale des écoulements monophasiques et liquide-gaz. Thèse Mécanique – Energétique, Université de Provence Aix-Marseille, 1. 21 Novembre 2007
- [23] A. Belhadj, B.Benyaya, T.E. Harabi, Etude de la performance des dissipateurs thermiques hybrides (ailettes, mousse métallique) aux configurations multiples dans un environnement de convection forcée , 2021
- [24] [https://www.google.com/imgres?imgurl=https://cbcn.ca/web/default/files/Anim/images/os-normal.png&tbnid=EGH-3NB\\_yKj2aM&vet=1&imgrefurl=https://www.cbcn.ca/fr/bonehealth&docid=3xOyrv5kZrb1bM&w=216&h=216&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m1/2&kgs=176eb9428082ecb5&shem=abme,trie](https://www.google.com/imgres?imgurl=https://cbcn.ca/web/default/files/Anim/images/os-normal.png&tbnid=EGH-3NB_yKj2aM&vet=1&imgrefurl=https://www.cbcn.ca/fr/bonehealth&docid=3xOyrv5kZrb1bM&w=216&h=216&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m1/2&kgs=176eb9428082ecb5&shem=abme,trie) la date : 29/03/2024 à 11 :00
- [25] Épreuve commune de TIPE - Session 2011
- [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] S. Pickering, *Metal Powder Report*, 53, 24, 1998.
- [34] VA. Ettel, *Taipeh Battery Forum*, 1999.
- [35] J. Babjak, VA. Ettel, V. Paserin, US Patent 4,957,543, 1990.
- [36] Inco Ltd, Product data sheet of “Incofoam”, Canada, 1998. <http://www.inco.com>
- [37] P. Liu, and GF. Chen, *Porous Materials, Processing and Applications*, Elsevier Science, 2014.
- [38] LA. Cohen, WH. Power, ,and DA. Fabel, *Mater. Eng.*, 67, 44, 1968
- [39] 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.
- [40] 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
- [41] 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
- [42] Y. Su, Analytical and numerical modeling of structure of metal porous polymer composite and its mechanical behaviors, in: *LASMIS, UTT, Troyes, France*, 2011.
- [43] 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>

[44] 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

[45] [https://www.google.com/imgres?imgurl=https://cloudfront.jove.com/files/ftp\\_upload/52268/52268fig3highres.jpg&tbnid=9zOIMOFvXH3CEM&vet=1&imgrefurl=https://www.jove.com/t/52268/casting-protocols-for-production-open-cell-aluminum-foams-replication?language%3DFrench&docid=vcqDhGRsXFoGeM&w=2376&h=1588&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m1/2&kgs=d3f26384c27178c8&shem=abme,trie](https://www.google.com/imgres?imgurl=https://cloudfront.jove.com/files/ftp_upload/52268/52268fig3highres.jpg&tbnid=9zOIMOFvXH3CEM&vet=1&imgrefurl=https://www.jove.com/t/52268/casting-protocols-for-production-open-cell-aluminum-foams-replication?language%3DFrench&docid=vcqDhGRsXFoGeM&w=2376&h=1588&hl=fr-DZ&source=sh/x/im/m1/2&kgs=d3f26384c27178c8&shem=abme,trie) la date: 04/04/2024 à 12:40

[46] K. Boomsma, D. Poulikakos, and F. Zwick, Metal foams as compact high performance heat exchangers, *Mech. Mater.*, vol. 35, 2003, 1161-1176.

[47] C. Curado, J. Ferreira, B. Lefevre, J. Piccot, mousses métalliques, *Projet MA15, UTT*

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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.

[51] A. Bhattacharya, V.V. Calmide, and R.L. Mahajan, Thermophysical properties of high porosity metal foams, *international journal of heat and mass transfer*, 45, 2002, 1017–1031.

[52] 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.

[53] 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>

[54] T. Belcher, and G. Schunk, Thermal characterization of 3D printed lattice structures. *Thermal & fluids analysis workshop. TFAWS, Hampton, VA.*, 2019.

[55] 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>

- [56] 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.
- [57] R. Dyga, and S. Witczak, Investigation of effective thermal conductivity aluminum foams. In *Procedia Engineering*, 2012.
- [58] 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.
- [59] 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
- [60] 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
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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>.
- [65] 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.
- [66] 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>
- [67] J. Ohser, C. Redenbach, A. Moghiseh: The PPI value of open foams and its estimation using image analysis, [International Journal of Materials Research](https://doi.org/10.3139/146.11105), Vol. 105, No. 7, (2014), 671-678. <https://doi.org/10.3139/146.11105>
- [68] V.V. Calmidi, *Transport Phenomena in High Porosity Fibrous Metal Foams*. Ph.D. Thesis, University of Colorado, 1998.

## **Chapitre 2**

# **Fabrication de la Mousse d'Aluminium**

## 2.1 Introduction :

Ce chapitre expose le processus de production de la mousse d'aluminium. Dans cette étude, on utilise la technique d'infiltration afin de préparer la mousse d'aluminium à cellules ouvertes. Dans ce chapitre, nous exposerons le processus de fabrication de la mousse et nous exposerons également les difficultés rencontrées lors de la création de nos mousses métalliques.

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

### 2.2.1 Les équipements et matériaux nécessaires :

Dans cette étude, il est relativement simple de mettre en place les équipements expérimentaux et les protocoles utilisés pour fabriquer des mousses d'aluminium par le biais d'une infiltration.

Pour fabriquer la mousse d'aluminium à cellules ouvertes, on a employé le banc d'essai Fig (2.1). Il est composé d'une bouteille de gaz argon utilisée pour injecter le gaz ; d'une pompe à vide qui était utilisée pour créer une dépression inférieure à 10 mbar dans le moule afin de prévenir l'oxydation de l'aluminium, faciliter l'infiltration de l'aluminium fondu entre les particules et empêcher la réaction du sel avec l'oxygène. Four et deux moules en acier inoxydable, l'une de 70 x 70 x 400 mm et l'autre de 60 x 200 mm de diamètre Fig (2.2). Chacun d'entre eux était lié par des conduits en acier inoxydable, en utilisant des vannes et des raccords adaptés. On a mesuré la pression du gaz en utilisant un manomètre et un vacuomètre à aiguille. Il est possible de contrôler la pression d'argon jusqu'à 10 bars, ainsi que le débit d'argon de la bouteille.

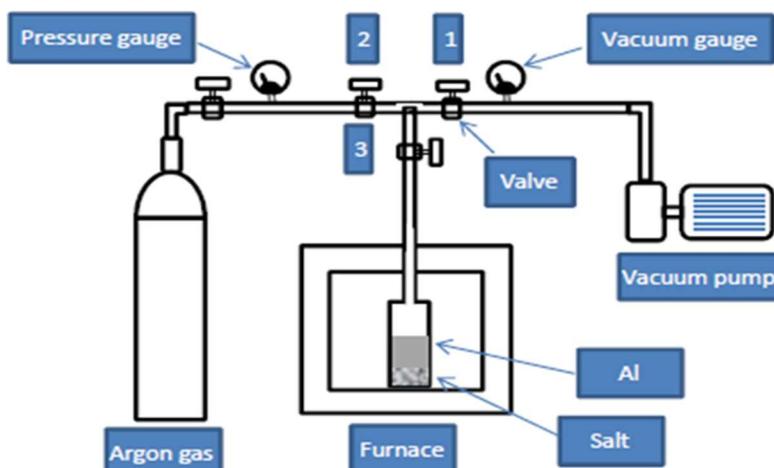
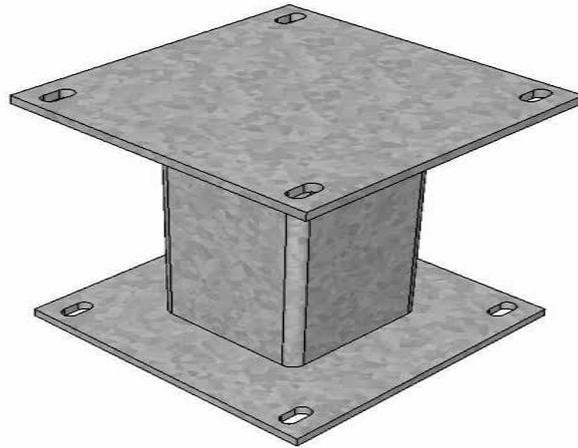


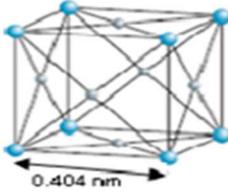
Figure 2.1 : Plate-forme de fabrication de mousse [44]



**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

**Tableau 2.1** Principales propriétés physiques de l'aluminium [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

▪ **Préparation préforme :**

La préparation de la préforme est la première étape du processus de fabrication de la mousse par infiltration. La forme négative de la mousse est la préforme, car elle occupe l'intégralité de l'espace qui deviendra poreux. On peut modifier la structure de la mousse en utilisant diverses formes et dimensions des matériaux préformés.

## Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium

Le matériau préformé doit satisfaire à trois exigences essentielles [2] :

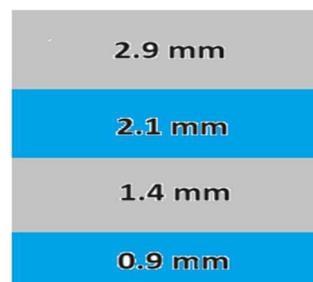
- 1- À une température de fusion supérieure à celle du métal coulé.
- 2- Maintenir une stabilité chimique au contact du métal en fusion.
- 3- Simple à retirer une fois que le métal est solidifié.

Pour notre étude, nous avons opté pour le chlorure de sodium qui répond à toutes ces exigences. Il atteint un point de fusion de 801 °C [3] et reste chimiquement inerte lorsqu'il entre en contact avec l'aluminium lors de l'infiltration et de la lixiviation. En outre, l'élimination de cette substance de la mousse ne génère pas de résidus toxiques ou dangereux [2].

Afin d'y parvenir, nous avons utilisé du sel de roche classique, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.2. Tout d'abord, on l'a broyé puis on l'a tamisé afin d'obtenir la taille souhaitée de notre préforme. Afin d'obtenir des particules de sel adéquates, la poudre de sel a été filtrée à travers différentes catégories de tamis. La fig 2.3. Illustre de manière schématique l'ordre des tamis.

**Tableau 2.2** Propriétés de sel

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>



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

Le premier tamis a été utilisé pour verser la poudre du sel broyé, puis elle a été agitée afin de séparer les particules. Comme illustré dans la fig 2.3, les particules qui ont été conservées dans le tamis inférieur ont servi à la production de mousse. Par exemple, les particules qui ont été conservées dans le tamis de taille 2,00 mm avaient une taille comprise

## Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium

entre 2,00 mm et 3,00 mm . Les tamis inférieurs de la fig 2.3. Étaient utilisés pour les trois tailles de particules de sel utilisées dans cette étude.

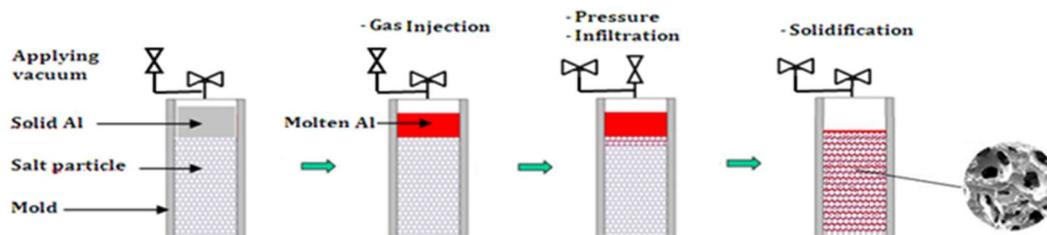
On a utilisé des échantillons de mousse métallique fabriqués à partir de particules de NaCl de 1,5 à 2,0 mm (Fig. 2.4).



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

### 2.2.2 Processus de Production des mousses :

Les mousses métalliques ont été fabriquées en utilisant le processus d'infiltration, qui comprend trois étapes : injection, infiltration et solidification (Fig. 2.5). Les particules de chlorure de sodium (sel) étaient utilisées comme support d'espace pour former l'intérieur de la mousse [4-6]. Seliger et Deuther ont développé la méthode sel-aluminium [7], dont l'avantage réside dans son coût réduit. En outre, le sel n'est pas nocif et s'élimine facilement avec de l'eau. Il est important de souligner que la taille des particules, la densité de la préforme et la pression d'infiltration peuvent influencer la porosité et la taille des pores [4]. La méthode sel-aluminium a été utilisée pour la fabrication des mousses d'aluminium dans cette étude. Trois tailles de particules de sel ont été employées pour des mousses avec des pores de différentes tailles (1-1.5 mm, 1.7-2 mm et 2-3 mm). En versant du sel dans un moule, on a créé la préforme, ce qui a permis à l'aluminium fondu de s'infiltrer dans la préforme. Durant cette étude, la méthode d'infiltration a été perfectionnée et élaborée.



**Figure 2.5 : Etapes principales de production du mousse d'aluminium à cellule ouvert.[6]**

## Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium

### ▪ Les étapes du processus :

La mousse d'aluminium est fabriquée en suivant les étapes suivantes :

- On introduit la poudre de Na Cl à infiltrer dans le moule.
- On dépose des fragments d'aluminium dans le moule et sur la préforme de Na Cl.
- Un joint en graphite est placé dans la cavité du couvercle de la plaque.
- Assemblage des goujons en acier inoxydable.
- Attachement de la partie supérieure du couvercle à la soupape.
- Toutes les vannes du système doivent être fermées.
- Déverrouillez la vanne qui conduit à la pompe à vide et au moule.
- La pompe à vide est activée jusqu'à atteindre une pression minimale.
- L'arrêt de la pompe à vide.
- Lorsque le taux de perte de vide dans le système est inférieur à 50 mbar pendant les 10 premières secondes après l'arrêt de la pompe à vide, cela signifie que le joint est assez bon pour permettre l'infiltration.
- Le moule est placé dans le four préchauffé sans débrancher le système de soupape et attend une heure jusqu'à ce que l'aluminium atteigne le point de fusion (680°C).
- Le robinet de la pompe à vide est clos.
- Une fois la vanne du réservoir d'argon ouverte, la pression et le débit d'infiltration sont réglés à l'aide des vannes ajustant.
- Après une durée de 3 minutes, la vanne de la bouteille d'argon se referme.
- Une fois que le moule a été retiré du four pendant 5 minutes, il est ensuite placé sur une surface de refroidissement (ici, un bloc de laiton).

**Note :** Durant le processus de refroidissement, il est possible que la pression dans le système évolue au début, ce qui nécessite une surveillance et une adaptation de la pression indiquée par le régulateur si besoin.

16. Après une période de 30 minutes, le système de soupape est retiré, puis le couvercle est démonté.

## Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium

### Remarque :

Afin de garantir l'élimination complète du Na Cl de la mousse, l'eau a été remplacée plus de 10 fois jusqu'à ce que le Na Cl soit entièrement éliminé. C'est lui. Il est également essentiel de vérifier régulièrement le poids de l'échantillon après une courte période de séchage

**Table 2.3** représente Caractérisation d'échantillon élaboré.

<b>Mousse Al</b>	<b><math>d_p</math> (Mm) valeur calculée</b>	<b><math>d_f</math> (Mm) valeur calculée</b>	<b><math>\varphi</math> Valeur expérimentale</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>) Valeur expérimentale</b>	<b><math>S_p</math> (m<sup>-1</sup>) Valeur Calculée</b>	<b>PPI Valeur expérimentale</b>
<b>AIF (0.65)</b>	<b>1.7</b>	<b>0.3</b>	<b>0.65</b>	<b>0.94</b>	<b>1228</b>	<b>PPI 15</b>

### 2.3 Mousse d'aluminium à cellules ouvertes produite :

On a obtenu des résultats satisfaisants, comme le montrent les figures 2.17 et 2.18 qui illustrent une face latérale d'échantillons de mousses d'Al à cellules ouvertes préparées avec des particules de NaCl. Il est observé que les pores des échantillons sont bien répartis du bas vers le haut. La répartition homogène de cette poreuse est en raison de l'infiltration de particules de NaCl dans Al entièrement fusible sous la pression du gaz argon injecté. Le NaCl solide présente une densité inférieure à celle de l'aluminium fondu, ce qui facilite une infiltration ascendante. La simplicité de ce processus est évidente, car il est envisageable de produire une mousse d'aluminium avec une taille de pores désirée. La structure à cellules ouvertes est formée par l'application systématique de particules de NaCl. Les caractéristiques de la mousse d'aluminium étaient essentiellement déterminées par la taille des pores et la pression d'infiltration. [6] .



**Figure 2.6 : Surface latérale des échantillons.**



**Figure 2.7 : Trois échantillons des mousses d'aluminium préparées par un moule rectangle.**

## **2.4 Conclusion**

La méthode d'infiltration a été analysée de manière théorique et expérimentale afin de préparer la mousse d'aluminium.

Lors d'une injection à faible débit, il est possible que le gaz s'échappe dans l'espace entre les parois du moule et l'al fondu, créant ainsi une pression négative à l'intérieur de la préforme. Cela entraîne une diminution de la différence de pression entre le haut et le bas de l'aluminium fondu, ce qui empêche le remplissage du vide.

Lors de l'infiltration, si la pression à l'intérieur du moule est élevée, l'aluminium fondu enveloppe les particules de sel et empêche leur filtrage complet à l'extérieur de l'échantillon, ce qui rend impossible leur dissociation par lessivage. En l'absence de pression d'infiltration adéquate, la mousse produite est incohérente et non homogène.

- Lors de l'infiltration, il est essentiel d'avoir une pression de seuil spécifique afin que l'aluminium fondu puisse pénétrer dans la préforme. Il est essentiel de maintenir une pression optimale afin de produire des échantillons de qualité, car cela détermine la proximité des pores dans la mousse.

Après avoir suivi les étapes du processus de production de mousse, des résultats satisfaisants ont été obtenus

## *Chapitre 2 : Fabrication de la Mousse d'Aluminium*

### **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] 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.
- [6] DJ. Fites, *Elaboration et caractérisation d'une mousse métallique* thèse de doctorat , Université Mohamed Khider – Biskra 2023
- [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.

# **Chapitre 3**

## **Étude expérimentale des performances thermiques d'échangeur de chaleur**

### **3.1 Introduction :**

Dans ce chapitre un modèle de transfert de chaleur a été examiné et vérifié numériquement par une étude expérimentale de mousses d'aluminium à cellules ouvertes ; Une comparaison est effectuée entre un échangeur de chaleur en mousse métallique et un échangeur en ailette d'aluminium à travers un montage illustré dans l'image ci-dessous. Cette comparaison a été réalisée avec l'aide d'Arduino qui fonctionne en lisant les températures via des capteurs de température à l'entrée et à la sortie de chaque échangeur.

### **3.2 Méthode expérimentale :**

#### **3.2.1 Préparation d'échangeur mousse d'aluminium :**

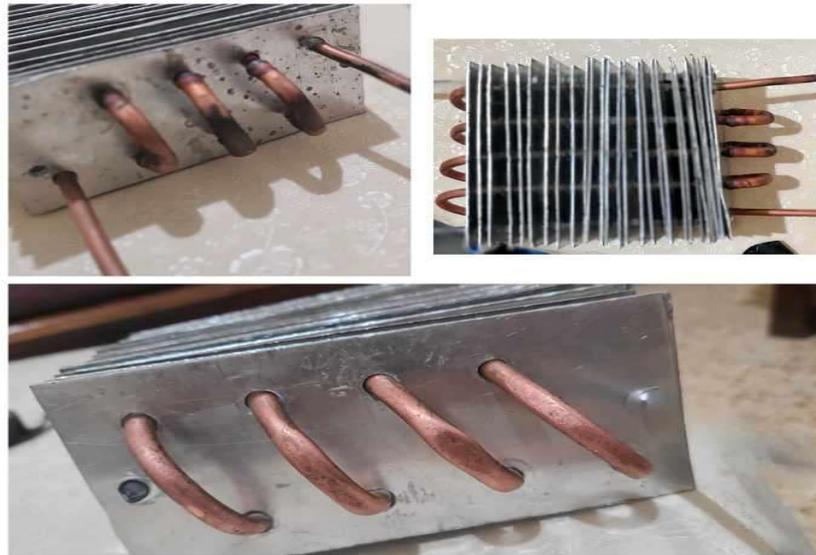
Les échantillons sont constitués de mousse métallique à travers laquelle un tube de cuivre a été passé pour imiter la forme d'un échangeur de chaleur. Cela se fait en faisant de l'aluminium pour souder les espaces entre le tube et la mousse. Fig (3.1)



**Figure 3.1 : échangeur mousse d'aluminium**

#### **3.2.2 Préparation d'échangeur a ailette :**

Nous découpons des morceaux d'aluminium symétriques aux mêmes dimensions que les échantillons de mousse métallique, puis nous les assemblons après avoir fait passer un tube de cuivre à travers, formant ainsi un échangeur de chaleur composé d'ailette. Fig (3.2)



**Figure 3.2 : échangeur a ailette**

### **3.2.3 Appareils d'essai :**

Le système expérimental (montage) est présenté dans la fig (3.3). Le montage comprend les principaux composants suivants : canal, section d'essai, moteur de soufflante, anémomètre numérique MT-4615, Arduino Uno R3, gamme de thermocouples du type K de 0 à 800 °C max 6675, base chauffée et un ordinateur. D'échangeur échantillons de mousse d'aluminium à cellules ouvertes.



**Figure 3.3 : Appareils d'essai**

### 3.2.3 Procédure de mesure :

Après la stabilisation des conditions de transfert de chaleur, les températures ont été enregistrées pour tous les points de mesure du système et transmises à un ordinateur à l'aide d'un enregistreur de données. On a évalué les données expérimentales dans un environnement unidimensionnel, et on a utilisé les données enregistrées pour effectuer des calculs afin de mesurer le rendement du système, fig(3.4).



**Figure 3.4 : Le système expérimental**

### 3.2.4 Arduino :

Il s'agit de cartes électroniques programmables (donc équipées d'un processeur et de mémoire) sur lesquelles nous avons la possibilité d'ajouter des capteurs de température, d'humidité, de vibration ou de lumière, une caméra, des boutons, des potentiomètres de réglage, des contacts électriques...

Des connecteurs sont également disponibles pour connecter des LED, des moteurs, des relais, des afficheurs, un écran...

Une carte Arduino est une machine à penser qui permet de rendre les systèmes électroniques plus intelligents et d'animer des appareils mécaniques. L'image ci-dessous montre une carte Arduino Uno, fig (3.5) [1].



**Figure 3.5 : Une carte Arduino Uno avec ses connecteurs.**

### **3.2.5 module MAX6675 :**

Un thermocouple de type K, le module MAX6675 est équipé d'un amplificateur et d'un convertisseur qui permettent de mesurer des températures allant de 0°C à 1024°C. Son débit est de 12 bits, sa précision est de 8 LSBs et sa résolution est de 0,25°C. Nous allons examiner en détail l'interfaçage du module avec Arduino et son utilisation pour mesurer la température, car il est l'un des choix idéaux pour mesurer des températures élevées [2].

#### **a) Principe de fonctionnement:**

Le thermocouple repose sur l'effet Seebeck pour son fonctionnement. Une force électromotrice (FEM) est produite lorsque deux métaux différents sont reliés pour former deux jonctions. Les métaux utilisés et la différence de température entre les deux extrémités influencent la valeur de cette FEM. En utilisant cette FEM, il est aisé de calculer la température de l'emplacement précis du thermocouple [2].

#### **b) Interfaçage du module MAX6675 avec Arduino:**

- **Liste des composants nécessaires:**

Pour interfacier le module MAX6675 avec Arduino Uno, vous aurez besoin des composants suivants :



**Figure 3.6 : MAX6675 Module Avec Thermocouple Type K [2].**



**Figure 3.7 : Câble de connexion M/F Jumper [2].**



**Figure 3.8 : Arduino Uno R3 avec câble USB [2].**

### **3.2.6 Schéma de connexion :**

Le schéma de connexion entre le module MAX6675 et Arduino est le suivant :

Connectez la broche GND du module au GND d'Arduino.

Connectez la broche VCC du module au pin 5V d'Arduino.

Connectez la broche SCK du module au GPIO 6 d'Arduino.

Connectez la broche CS du module au GPIO 5 d'Arduino.

Connectez la broche SO du module au GPIO 4 d'Arduino.

Connectez les broches Thermocouple+ (TH+) et Thermocouple- (TH-) du module aux bornes positives et négatives du thermocouple respectivement. [2]

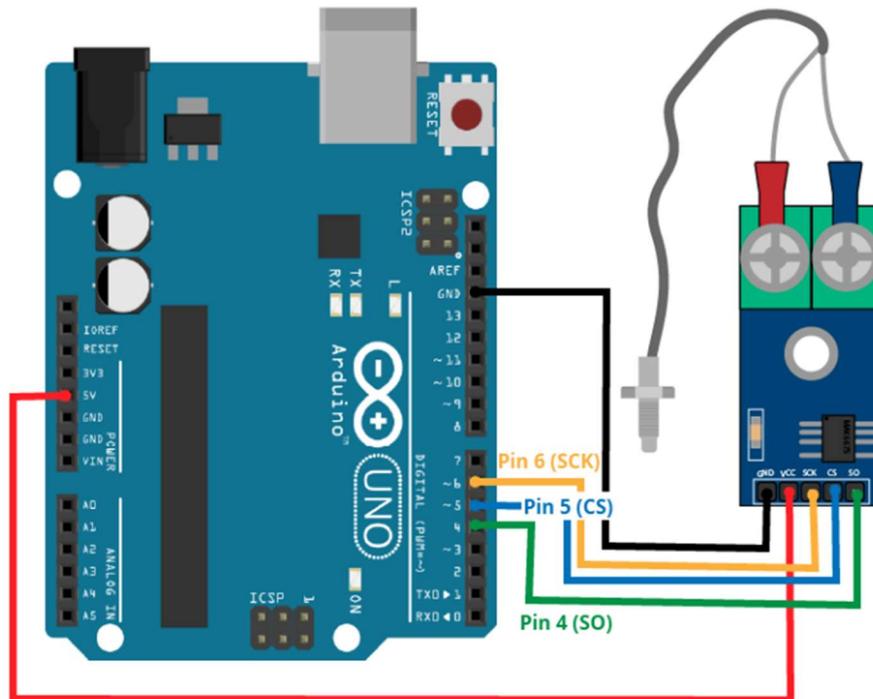


Figure 3.9 : Schéma [2].

### 3.2.6.1 Installation de la bibliothèque MAX6675 :

Afin de rendre le module MAX6675 plus facile à utiliser, il est possible d'installer la bibliothèque MAX6675 dans l'IDE Arduino. Adafruit est le fournisseur de la bibliothèque. Pour l'activer, rendez-vous dans le menu "Sketch" > "Incluez des bibliothèques" > "Gestion des bibliothèques". Découvrez le terme "max6675" et installez la version la plus récente disponible. [2]

### 3.2.7 Code Arduino : Accéder aux lectures de température :

```
#include <GyverMAX6675.h>

// تعريف المكونات
#define CLK_PIN 13 // الساعة SCK
#define DATA_PIN 12 // مدخل البيانات SO
#define CS_PIN1 10 // مدخل التحكم CS للحساس الأول
#define CS_PIN2 9 // مدخل التحكم CS للحساس الثاني
#define CS_PIN3 8 // مدخل التحكم CS للحساس الثالث
#define CS_PIN4 7 // مدخل التحكم CS للحساس الرابع

// باستخدام الأوصاف السابقة GyverMAX6675 تعريف كائنات
GyverMAX6675<CLK_PIN, DATA_PIN, CS_PIN1> sensor1;
GyverMAX6675<CLK_PIN, DATA_PIN, CS_PIN2> sensor2;
```

```
GyverMAX6675<CLK_PIN, DATA_PIN, CS_PIN3> sensor3;
GyverMAX6675<CLK_PIN, DATA_PIN, CS_PIN4> sensor4;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // قراءة درجات الحرارة من الحساسات
  double temp1, temp2, temp3, temp4;

  if (sensor1.readTemp()) {
    temp1 = sensor1.getTemp();
  } else {
    temp1 = -1;
  }

  if (sensor2.readTemp()) {
    temp2 = sensor2.getTemp();
  } else {
    temp2 = -1;
  }

  if (sensor3.readTemp()) {
    temp3 = sensor3.getTemp();
  } else {
    temp3 = -1;
  }

  if (sensor4.readTemp()) {
    temp4 = sensor4.getTemp();
  } else {
    temp4 = -1;
  }

  // طباعة درجات الحرارة على Serial Monitor
  Serial.println("Temperature from sensors:");
  Serial.print("Sensor 1: ");
  Serial.print(temp1);
  Serial.println(" °C");

  Serial.print("Sensor 2: ");
  Serial.print(temp2);
  Serial.println(" °C");

  Serial.print("Sensor 3: ");
  Serial.print(temp3);
```

```

Serial.println(" °C");

Serial.print("Sensor 4: ");
Serial.print(temp4);
Serial.println(" °C");

delay(1000); // انتظار ثانية قبل القراءة التالية
}
    
```

### 1.3 Les calculs analytiques de performance thermique :

#### a) Echangeur a ailette :

**Tableau (3-1)** Propriétés thermiques et températures des fluides  
(Échangeur a ailette)

	Fluide chaud (eau)	Fluide froid (air)
Débit volumique	300 (l/h)	0.014 (m <sup>3</sup> /s)
Débit massique (kg/s)	0.0833	0.01806
La masse volumique (kg/ m <sup>3</sup> )	1000	1.29
Capacité calorifique (Cp) (j/kg. k)	4180	1004
Température d'entrée °C	36	23
Température de sortie °C	34.5	24

- **Différence de température moyenne logarithmique :**

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{e(ch)} - T_{e(f)}) - (T_{s(ch)} - T_{s(f)})}{\ln\left(\frac{T_{e(ch)} - T_{e(f)}}{T_{s(ch)} - T_{s(f)}}\right)} = \frac{(36 - 23) - (34 - 24)}{\ln\left(\frac{36 - 23}{34 - 24}\right)} = 11.43 \text{ °C}$$

- **La capacité thermique totale de la substance chaude**

$$C_{ch} = \dot{m}_{ch} \times C_{p_{ch}} = (1000 \times (300 \times 10^{-3}) / 3600) \times 4180 = 348.194 \text{ W/ k}$$

- **Flux thermique chaud:**

$$Q_{ch} = \dot{m}_{ch} \times C_{p_{ch}} \times (T_{e(ch)} - T_{s(ch)}) = 348.194 \times (36 - 34.5) = 522.291 \text{ W}$$

- Le capacité thermique totale de la substance froide

$$C_f = \dot{m}_f \times C_{p_f} = (1.29 \times 0.014) \times 1004 = 18.13224 \text{ W/K} \Rightarrow C \text{ min}$$

- Flux thermique froid:

$$Q_f = \dot{m}_f \times C_{p_f} \times (T_{e(f)} - T_{s(f)}) = 18.13224 \times (24 - 23) = 18.13224 \text{ W}$$

- L'efficacité:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_{max}} = \frac{(T_{e(f)} - T_{s(f)})}{(T_{e(ch)} - T_{e(f)})} = \frac{(24 - 23)}{(36 - 23)} = 0.0769 \approx 0.08 = 8 \%$$

$$Z = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{18.13224}{348.194} = 0.0520$$

- Le nombre d'unité de transfert de chaleur

$$Nut = \frac{1}{1 + Z} \ln \left( \frac{1}{1 - \varepsilon(1 + Z)} \right)$$

$$Nut = \frac{1}{1 + 0.0520} \ln \left( \frac{1}{1 - 0.08(1 + 0.0520)} \right)$$

$$Nut = 0.0835$$

- Le coefficient d'échange thermique

$$k = \frac{Nut \times C_{min}}{S} = (0.0835 \times 18.13224) / (6.40 \times 10^{-3}) = 235.152 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$$

**b) Echangeur de la mousse métallique :**

**Tableau (3-2) :** Propriétés thermiques et températures des fluides

(Échangeur de la mousse métallique)

	Fluide chaud (eau)	Fluide froid (air)
Débit volumique	300 (l/h)	0.014 (m <sup>3</sup> /s)
Débit massique (kg/s)	0.0833	0.01806
La masse volumique (kg/ m <sup>3</sup> )	1000	1.29
Capacité calorifique (Cp) (j/kg.k)	4180	1004
Température d'entrée °C	36	23
Température de sortie °C	34	24.5

- Différence de température moyenne logarithmique

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{e(ch)} - T_{e(f)}) - (T_{s(ch)} - T_{s(f)})}{\ln\left(\frac{T_{e(ch)} - T_{e(f)}}{T_{s(ch)} - T_{s(f)}}\right)} = \frac{(36 - 23) - (34 - 24.5)}{\ln\left(\frac{36 - 23}{34 - 24.5}\right)} = 11.158 \text{ °C}$$

- La capacité thermique totale de la substance chaude

$$C_{ch} = \dot{m}_{ch} \times Cp_{ch} = (1000 \times (300 \times 10 - 3) / 3600) \times 4180 = 348.194 \text{ W/K}$$

- Flux thermique chaud

$$Q_{ch} = \dot{m}_{ch} \times Cp_{ch} \times (T_{e(ch)} - T_{s(ch)}) = 348.194 \times (36 - 34) = 696.388 \text{ W}$$

- La capacité thermique totale de la substance froide

$$C_f = \dot{m}_f \times Cp_f = (1.29 \times 0.014) \times 1004 = 18.13224 \text{ W/K} \Rightarrow \text{C min}$$

- Flux thermique froid

$$Q_f = \dot{m}_f \times Cp_f \times (T_{e(f)} - T_{s(f)}) = 18.13224 \times (24.5 - 23) = 27.198 \text{ W}$$

- L'efficacité

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_{max}} = \frac{(T_{e(f)} - T_{s(f)})}{(T_{e(ch)} - T_{e(f)})} = \frac{(24.5 - 23)}{(36 - 23)} = 0.1153 \approx 0.12 = 12 \%$$

$$Z = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{18.13224}{348.194} = 0.0520$$

- Le nombre d'unité de transfert de chaleur

$$Nut = \frac{1}{1 + Z} \ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon(1 + Z)}\right)$$

$$Nut = \frac{1}{1 + 0.0520} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.12(1 + 0.0520)}\right)$$

$$Nut = 0.128$$

- Le coefficient d'échange thermique

$$k = \frac{Nut \times C_{min}}{S} = (0.128 \times 18.13224) / (5.64 \times 10^{-3}) = 411.511 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$$

### 3.4 Discussion et Résultats :

Tableau (3-3) les résultats d'étude

	$\Delta T_{ML}$ (°C)	$Q_{ch}$ (w)	$Q_f$ (w)	$\varepsilon$	$Nut$	$k$ (W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )
Echangeur de la mousse métallique	11.158	696.388	27.198	12 %	0.128	411.511
Echangeur a ailette	11.43	522.291	18.13224	8 %	0.0835	235.152

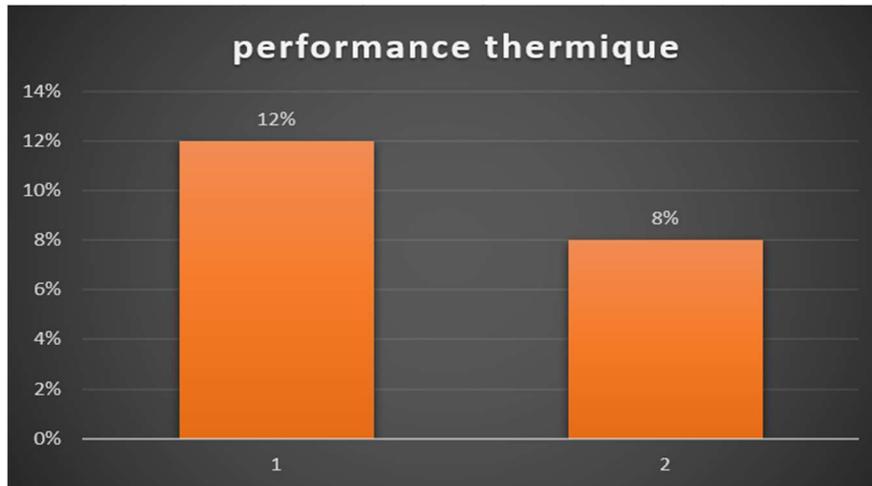
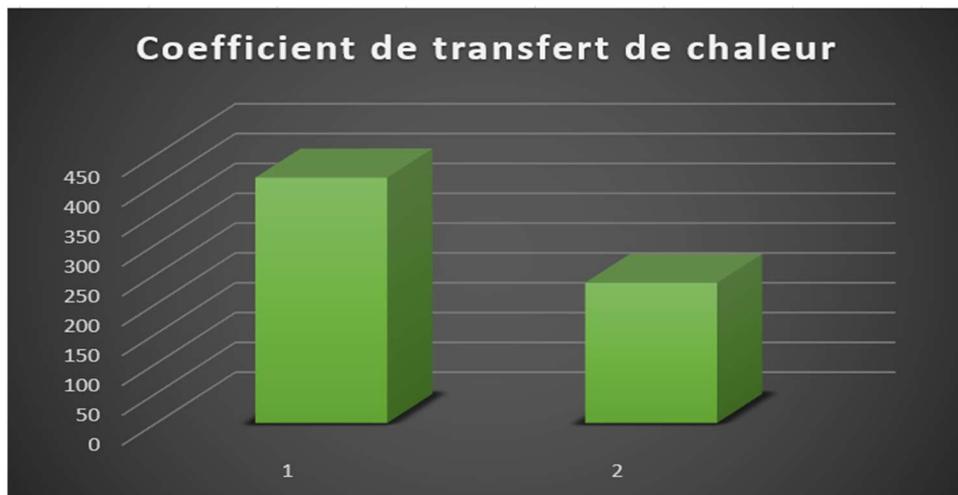


Figure 3.10 : Graphiques à barres montrant une comparaison entre les performances thermiques d'un échangeur de la mousse métallique (1) et d'un échangeur à ailette (2)

Le graphique montre une comparaison des performances thermiques entre deux types d'échangeurs : un échangeur de la mousse métallique (1) et un échangeur à ailette (2). Les résultats indiquent que l'échangeur de la mousse métallique a une performance thermique de 12 %, tandis que l'échangeur à ailette a une performance de 8 %. Ainsi, l'échangeur de la mousse métallique démontre une meilleure efficacité thermique par rapport à l'échangeur à ailette.



**Figure 3.11 : Graphiques à barres montrant une comparaison entre les coefficients de transfert de chaleur d'un échangeur de la mousse métallique (1) et d'un échangeur à ailette (2).**

Le graphique montre une comparaison des coefficients de transfert de chaleur entre deux types d'échangeurs de chaleur : un échangeur de chaleur à mousse métallique (1) et un échangeur de chaleur à ailettes (2). Le coefficient de transfert de chaleur pour l'échangeur de chaleur à mousse métallique est d'environ 411 w/m.k, tandis que pour l'échangeur de chaleur à ailettes, il est d'environ 235 w/m.k. Cela indique que l'échangeur de chaleur à mousse métallique a un coefficient de transfert de chaleur presque deux fois plus élevé que celui de l'échangeur de chaleur à ailettes. , démontrant une meilleure efficacité pour le transfert de chaleur.

Ce chapitre comprend des travaux appliqués dans lesquels nous avons mesuré les températures à l'entrée et à la sortie de deux échangeurs de chaleur différents, le premier étant un échangeur de chaleur à ailettes et le second un échangeur de chaleur à mousse métallique, en utilisant une configuration expérimentale. Cela implique également des applications mathématiques pour calculer l'efficacité et le coefficient de transfert de chaleur. Sur la base des résultats obtenus, l'échangeur de chaleur à mousse métallique surpasse l'échangeur de chaleur à ailettes en termes de performances.

On observe que l'efficacité de l'échangeur thermique à mousse métallique est de 12%, tandis que celui de l'échangeur thermique à ailettes atteint 8%. Cette différence d'efficacité est attribuée à la différence de température entre l'entrée et la sortie des deux échangeurs de chaleur. Dans l'échangeur de chaleur à mousse métallique, un coefficient d'échange thermique de 411,511 w/m.k a été atteint, contre 235,152 w/m.k pour l'échangeur de chaleur à ailettes. Cela est dû à la présence de plusieurs points de contact qui permettent d'augmenter le taux de

transfert de chaleur dans l'échangeur thermique à mousse métallique par rapport à un échangeur thermique à ailettes.

Il est évident que l'échangeur thermique à mousse métallique présente un potentiel prometteur de développement et de perfectionnement pour offrir un avantage significatif dans les applications de refroidissement. Avec les progrès et la recherche continue, l'échangeur de chaleur à mousse métallique est susceptible de devenir un élément clé de l'industrie des échangeurs de chaleur, impactant divers secteurs tels que les échangeurs de chaleur et d'autres domaines connexes.

## **Références :**

[1] <https://www.positron-libre.com/electronique/arduino/arduino.php>

[la date : 28/04/2024 à 13 :30](#)

[2] <https://www.moussasoft.com/max6675-module-thermocouple-avec-arduino/>

[la date : 05/05/2024 à 14 :30](#)

## **Chapitre 4 - Conclusions et travaux futurs**

### **4.1. Remarques finales :**

L'étude actuelle a couvert plusieurs sujets pour aider à comprendre le transfert de chaleur et la mécanique des fluides dans les mousses métalliques fabriquées par la méthode de réplification. Les résultats de cette étude pourraient aider à développer des échangeurs hautes performances et à faible coût. La liste suivante est un bref résumé des réalisations et du travail qui reste à faire.

### **4.2. Fabrication des mousses :**

1- Trois particules de sel de tailles différentes ont été utilisées pour fabriquer de la mousse d'aluminium avec le processus de réplification.

2- La méthode d'infiltration pour le processus de réplification a été étudiée et des méthodes utilisant uniquement du gaz ont été introduites. Il a été constaté que les échantillons fabriqués par la méthode au gaz étaient de qualité et que le processus était reproductible.

3- La pression d'infiltration optimale pour la méthode gaz uniquement a été étudiée et la pression optimale d'infiltration pour trois tailles de pores, ont été identifiées.

### **4.3 Mesure du transfert de chaleur :**

La performance thermique d'échangeur de chaleur utilisant de la mousse d'aluminium produite par la méthode de réplification (infiltration) montre de coefficient de transfert de chaleur plus élevé par rapport à l'échangeur de chaleur à ailettes traditionnel. Cela est dû à la surface et à la porosité améliorée de la structure de la mousse, ce qui permet une meilleure efficacité du transfert de chaleur. La méthode de réplification permet un contrôle précis de la structure de la mousse, ce qui entraîne des performances thermiques optimisées. Dans l'ensemble, l'échangeur de chaleur utilisant de la mousse d'aluminium produite par la méthode de réplification a tendance à présenter des performances thermiques et une efficacité améliorées par rapport au échangeur de chaleur à ailette traditionnel.

### **4.4. Travail futur :**

Au cours de cette étude, plusieurs opportunités ont été découvertes qui pourraient améliorer les résultats de cette recherche. Cependant, il n'a pas été possible de mettre en œuvre

ces idées dans cette étude, principalement en raison de contraintes sur le temps et budgétaires et temporelles. La liste suivante constitue les travaux futurs recommandés :

#### **4.4.1. Améliorer le système de thermométrie :**

Pour cette étude, des thermocouples de type K ont été utilisés pour mesurer la température dans l'échantillon. La principale raison du choix du thermocouple de type K était le coût du système de thermométrie à réponse rapide. Le système actuel offre un niveau de précision acceptable, mais pour une meilleure précision, les thermocouples de type K ne seraient pas recommandés. Au lieu de cela, un système d'anémomètre à fil froid serait un système de thermométrie idéal pour cette application en raison de sa haute fréquence et de sa précision.

#### **4.4.2. Mesurer la conductivité thermique efficace :**

Connaître la conductivité thermique efficace des échantillons est important pour prédire avec précision la température de sortie. Connaître cette valeur est indispensable pour la méthode du gradient maximum, et sans cette valeur, utiliser cette méthode produirait une erreur importante. Par conséquent, une mesure directe du  $k_{eff}$  est recommandée pour une étude future. Il serait important de mesurer cette valeur et de valider les résultats estimés dans cette étude

#### **4.4.3. Fabriquez davantage d'échantillons grâce à un mécanisme d'emballage amélioré :**

Pour cette étude, trois échantillons ont été fabriqués en conditionnant aléatoirement les particules de sels.

Davantage d'échantillons devaient être fabriqués pour identifier statistiquement les écarts des échantillons. Cela pourrait être fait en faisant vibrer le paquet de particules de sels pour garantir une densité de tassement constante.

#### **4.4.4.. Fabrication des mousses avec différentes formes de pores :**

La densité de tassement dépend de plusieurs facteurs tels que la forme, la taille et le facteur de friction entre les particules. La densité de la mousse métallique dépend de la densité de compactage de la préforme et de la pression d'infiltration. Par conséquent, changer la forme des particules de sel peut modifier la densité de la mousse et les performances en matière de

#### *Chapitre 4 - Conclusions et travaux futurs*

chute de pression. Étant donné que les mousses réalisées pour cette étude ont été fabriquées à partir de particules de sel broyées, il serait intéressant de voir l'effet de la forme des particules sur les performances des échantillons.