



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

**Etude numérique du transfert de chaleur et de
la perte de charge du dissipateur thermique à
ailettes elliptiques en mousse métallique pour
les applications de refroidissement électronique**

Réalisé par : - Habbeche raouia
- Ferroudj romaissa yassina

Dirigé par : Mr. Sid noureddine

Membres de jury :

- Boulahrouz salim
- hannachi bouzid

MCA
MAA

Peresident
Examinateur

Présenté le 26/06/2022



Remerciements

Nous remercions dieu de nous avoir donné la force de survivre et de surmonter toutes les difficultés de courage.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr Sid Nouréddine**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions s'adresse à **Mr Chargui laïd** pour son aide pratique et son soutien moral et son encouragement.*

*Nous remercions les membres du jury **Boulahrouz Salim** et **Hannachi Bouzid** qui ont accepté de juger notre travail.*

Nous remercions également tous nos professeurs pour leur générosité et leur grande patience qu'ils ont montrée, malgré les charges académiques et professionnelles.

Dédicace

Je dédie a Modest travail à :

Mes très chers parents, ma mère pour ce qu'elle à fait

pour me

rend heureuse « je lève mon chapeau a vous ».

Mon frère pour le soutien et l'encoururent.

Mes sceurs aussi.

Tout mes collègue de promotions.

Mo, binôme de ce travail « yassina ferroudj ».

Meilleur amie dans la vie « chahra abidi ».

Et à mon marie « youcef »

Raouia « Michou »

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents ma mère
et mon père pour leur patience, leur amour, leur
soutien et leur encouragement.*

À mes frères.

À mes amie et mes camarades.

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du
moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

F- Yassina « romaïssa »

Résumé

Ce travail présente une simulation numérique 3D transitoire par le logiciel comsol 5.3 du comportement thermo hydraulique d'un dissipateur thermique à ailettes elliptiques en mousse d'aluminium au sein d'un canal horizontale. Les résultats de la simulation numérique ont montré que (i) l'augmentation de nombre d'ailettes il a l'effet inverse sur le transfert de chaleur du dissipateur thermique, (ii) lors de l'utilisation des ailettes elliptiques, nous ne remarquons pas de chute de pression significative, (iii) une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air contribue à une augmentation progressive du coefficient de transfert de chaleur au sein du dissipateur, (iv) Le flux de chaleur du radiateur augmentera la température du système et atteindra des valeurs inacceptables.

Abstract

This work presents a a transient 3D numerical simulation by the software comsol 5.3 of the thermohydraulic behavior of a heat sink with elliptical fins in aluminum foam within a horizontal channel. Numerical simulation results showed that (i) increasing fin number has the opposite effect on heat sink heat transfer, (ii) when using elliptical fins, we only notice no significant pressure drop, (iii) an increase in airflow velocity contributes to a gradual increase in the heat transfer coefficient within the heatsink, (iv) The heat sink heat flow will increase the temperature of the system and reach unacceptable values.

ملخص

يقدم هذا العمل محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد عابرة بواسطة برنامج comsol 5.3 للسلوك الهيدروليكي الحراري لمشتت حراري بزعانف بيضاوية الشكل من رغوة الألمنيوم داخل قناة أفقية. أظهرت نتائج المحاكاة العددية أن (1) زيادة عدد الزعانف لها تأثير معاكس على انتقال الحرارة داخل المشتت الحراري ، (2) عند استخدام الزعانف البيضاوية ، نلاحظ عدم وجود انخفاض كبير في الضغط ، (3) تساهم الزيادة في سرعة تدفق الهواء في الزيادة التدريجية في معامل نقل الحرارة داخل المشتت الحراري ، (4) سيؤدي تدفق حرارة المشتت الحراري إلى زيادة درجة حرارة النظام ويصل إلى قيم غير مقبولة..

Tableaux des matières

Tableaux des matières

Résumé

Tableaux des matières.....i

Liste des tableaux.....vii

Liste des figures.....viii

Nomenclature.....xii

Introduction générale.....xiv

Chapitre I : Revue bibliographique

I-1- Introduction.....2

I-2- Etat bibliographique.....2

I-3- Conclusion.....5

Chapitre II : Généralités sur les mousses métalliques

II-1- Introduction.....7

II-2- Généralités sur les matériaux cellulaires.....7

II-2-1- Définition.7

II-2-2- Les types des matériaux cellulaires7

II-3- Définition d'une mousse métallique9

II-4- Les différents types de mousse métalliques11

Tableaux des matières

II-4-1- Mousses métalliques à pores ouverts	11
II-4-2- Mousses métalliques à pores fermés	12
II-4-3- Mousses métalliques régulière	13
II-4-4- Mousses métalliques stochastiques	14
II-5- Propriétés géométriques des métalliques.....	15
II-5-1- La porosité	15
II-5-2- Diamètre de pore	15
II-5-3- Surface spécifique	15
II-6- Procédés de fabrication des mousses métalliques.	16
II-6-1- Voie gazeuse.	16
II-6-2- Voie liquide	17
II-6-3- Voie solide.	17
II-7- Les avantages et domaines d'utilisations des mousses métalliques	18
II-7-1- Propriétés et avantages des mousses métalliques.....	18
II-7-2- Domaines d'applications des mousses métalliques	19
II-8- Conclusion	25

Chapitre III : Refroidissement des composantes électriques

Tableaux des matières

III-1- Introduction	27
III-2- Les transferts de chaleur	27
III-2-1- La conduction	27
III-2-2- La convection	27
III-2-3- Le rayonnement	28
III-3- Les ailettes	28
III-3-1- Échangeurs à tubes ailettes.	28
III-3-1-1- Ailettes transversales	28
III-3-1-2- Ailettes longitudinales	30
III-4- Le dissipateur de chaleur électronique	30
III-4- Le dissipateur de chaleur électronique	30
III-4-2- Le principe de dissipateur de chaleur ...	31
III-4-3- Les différents types de dissipateur de chaleur.	32
III-4-3-1- Dissipateurs de chaleur actifs	32
III-4-3-2- Dissipateurs de chaleur passifs	32
III-4-3-3- Dissipateur de chaleur en aluminium	33
III-4-3-4- Dissipateurs de chaleur estampés	33

Tableaux des matières

III-4-3-5- Usinage des dissipateurs thermiques	34
III-4-3-7- Dissipateurs de chaleur à ailettes pliées.	35
III-4-3-8- Dissipateurs de chaleur biseautés	35
III-4-3-9- Dissipateurs de chaleur forgés	36
III-4-3-10- Dissipateurs thermiques à ailettes simples.	36
III-4-3-11- Dissipateurs de chaleur sertis	37
III-5- refroidissement électronique	37
III-5-1- La définition	37
III-5-2- Le rôle de refroidissement.	38
III-5-3- Les systèmes de refroidissement	39
a) Les systèmes de refroidissement monophasiques	40
b) Systèmes de refroidissement diphasique	45
c) Drain thermique.....	45
d) Refroidissement par effet palties	46
III-6- Conclusion	47
 Chapitre IV : Modélisation mathématique	
IV-1- Introduction	49

Tableaux des matières

IV-3- Modèle d'écoulement dans les milieux poreux.	49
IV-5- Transfert de matière dans un milieu poreux	49
IV-4- Transfert thermique dans un milieu poreux.....	50
IV-7- Description du problème	50
IV-2- La géométrie du problème	51
IV-8- Hypothèses simplificatrices	52
IV-9- Formulation mathématique	52
IV-10- Les conditions initiales aux limites.....	53
 Chapitre V : la simulation numérique par COMSOL	
V-1- Introduction	56
V-2- Géométrie et conditions aux limites du système étudié.....	56
V-3- Maillage du système étudié.....	57
V-4- Présentation du COMSOL.	57
V-5- Avantage de conception avec COMSOL MULTIPHYSIC	57
V-6- Résultats de la simulation numérique.....	58
V-6-1- Distribution de la température.....	58
V-6-2- Distribution de la vitesse	59

Tableaux des matières

V-6-3- Distribution de la pression	60
V-7- Etude paramétrique	61
V-7-1- Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la température	61
V-7-2- Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la vitesse	62
V-7-3- Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la pression.....	63
V-7-4- Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la température	64
V-7-5- Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la pression	65
V-7-6- Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la vitesse..	66
V-7-7- Effet du flux dissipé sur la distribution de la température	67
V-7-8- Effet du flux dissipé sur la distribution de la pression	68

Conclusion générale

Tableaux des matières

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableaux (II.1) : Différents métaux cellulaires existant.....	9
--	---

Listes des figures

Listes des figures

Figure (II-1) : Photographie d'une mousse métallique à cellule ouverte.....	10
Figure (II-2) : Schéma montrant les principales applications des mousses métalliques.....	11
Figure(II-3) : Mousse métallique à pores ouvertes.....	12
Figure (II-4) : Mousse métallique à pores fermés.....	13
Figure (II-5) : Mousse métallique régulière.....	14
Figure (II-6) : Mousse métallique stochastique.....	14
Figure (II-7) : Présentation d'une mousse métallique à pores ouvert.....	15
Figure (II-8) : Procédé de fabrication de mousse par voir gazeuse.....	16
Figure (II-9) : Procédé de fabrication de mousse par voie liquide.....	17
Figure (II-10) : Procédé de fabrication de mousse par voir solide.....	17
Figure (II-11) : Plusieurs échangeurs de chaleur sur la photo(A) et un filtre sur la figure(B).....	20
Figure (II-12) : Schéma constitutif d'une batterie rechargeable en NI-cd.....	21
Figure (II-13) : Production d'une mousse par l'addition d'une phase volatile.....	21
Figure (II-14) : Des poutres en mousse qui servent à arrêter les flammes.....	22
Figure (II-15) : Photos d'un échangeur de chaleur conçu avec de la mousse de cuivre.....	22
Figure (II-16) : Photos des mousses en forme sandwich.....	23
Figure (II-17) : Base d'un bras de levage fait à partie des panneaux de sandwich (AFS, Gmbh à Sarrebruck, Allemagne).....	24
Figure (II-18) : Prototype d'un support moteur BMW construit par LKRE (Ranshofen,	

Listes des figures

Autriche).....	24
Figure (II-19) : Prototype de système d’ancrage poreux pour implants dentaires et de hanches en titane.....	25
Figure (III-1) : Ailettes continues et ailettes indépendantes pour tubes.....	30
Figure (III-2) : Ailettes annulaires et ailettes spiralées.....	31
Figure (III-3) : Tubes avec différents types d’ailettes longitudinales.....	31
Figure (III-4) : Un dissipateur de chaleur refroidi par ventilateur sur le processeur d'un ordinateur personnel. À droite, un dissipateur de chaleur plus petit refroidit un autre circuit intégré de la cartemère.....	32
Figure (III-5) : dissipateur de chaleur actif.....	33
Figure (III-6) : dissipateur de chaleur passif.....	34
Figure (III-7) : dissipateur de chaleur aluminium.....	34
Figure (III-8) : dissipateur de chaleur estampé.....	35
Figure (III-9) : dissipateur de chaleur thermique.....	35
Figure (III-10) : dissipateur thermique à ailettes colées.....	36
Figure (III-11) : dissipateur de chaleur à ailettes pliées.....	36
Figure (III-12) : dissipateur de chaleur biseauté.....	37
Figure (III-13) : dissipateur de chaleur forgé.....	37
Figure (III-14) : dissipateur thermique à ailettes simple.....	38
Figure (III-15) : dissipateur de chaleur sertis.....	38
Figure (III-16) : Classification des systèmes de refroidissement passif(LUSAC)....	41
Figure (III-17) : Exemple d’ailette de refroidissement et de nid d’abeille pour	

Listes des figures

augmenter la surface d'échange convectif (ELECTROLUBE).....	42
Figure (III-18) : Système de refroidissement forcé par air Radiateur (Fisher Elektronik) et ventilateur(SEPA).....	43
Figure (III-19) : Refroidissement liquide à micro-canaux (EnermaxLiqmax 120S).....	44
Figure (III-20) : Refroidissement liquide à mini-canaux (CeramCool® LiquidCoolin).....	44
Figure (III-21) : Refroidissement liquide à plaque froide (AREELIS Technologies.....	44
Figure (III.22) : Exemples de modules spray cooling (SPRAYCOOLL).....	45
Figure (III.23) : Refroidissement par jets.....	46
Figure (III.24) : Principe et exemples de drains thermiques externes.....	47
Figure (III.25) : Effet Peltier.....	48
Figure (IV.1) : Géométrie du problème considéré.....	51
Figure (V.1) : Géométrie 3D et conditions aux limites du système étudié.....	56
Figure (V.2) : Maillage 3D du système étudié.....	57
Figure (V-3) : Distribution de la température à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q_{\text{source}} = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$	59
Figure (V.4) : Distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$	60
Figure (V-5) : Distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q_{\text{source}} = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$	61
Figure (V.6) : Distribution de la température pour différentes nombre d'ailettes elliptiques à travers du dissipateur thermique sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$	62
Figure (V-7) : Distribution de nombre des ailettes à travers de dissipateur thermique à sous	

Listes des figures

conditions $q_{\text{source}} = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$63

Figure (V-8) : Distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q_{\text{source}} = 5 \text{ W}$, $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$64

Figure (V-9) : Distribution du la température à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q_{\text{source}} = 5 \text{ W}$, $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$65

Figure (V.10) : distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$66

Figure (V-11) : Distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q_{\text{source}} = 5 \text{ W}$, $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$67

Figure (V-12) : Distribution du la température à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la flux de chaleur dans canal sous les conditions $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$, $q_{\text{source}} = 5, 20, 30, 40 \text{ W}$68

Figure (V-13) : Distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la flux de chaleur dans canal sous les conditions $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$, $q_{\text{source}} = 5\text{W}$69

Figure (V-14) : Distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différents valeur de la flux de chaleur dans canal sous les conditions $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$, $q_{\text{source}} = 5, 20, 30, 40 \text{ W}$60

Nomenclature

Nomenclature

T	Température
U	Vitesse
P	pression
h	hauteur d'ailette
g	Accélération de la pesanteur
K	la perméabilité du milieu poreu
K_m	La perméabilité équivalente du milieu
φ	flux de chaleur
C_p	chaleur de massique à pression constante
ρ_0	Masse volumique du l'air à T_0
K_f	conductivité thermique de la mousse
C_f	Le coefficient du terme de Forchheimer
$\vec{\nabla}$	Nabla
d_p	diamètre du porte
d_f	diamètre de fibre
T_s	Température de solide
T_f	Température de fluide
q_{source}	la source de chaleur

Lettre grecques

β	Le coefficient d'expansion thermique
---------	--------------------------------------

Nomenclature

ε	porosité
μ	Viscosité dynamique
ρ	Masse volumique de l'air
ν	Viscosité cinématique

Introduction générale

De nos jours, les composants électroniques de puissance deviennent plus petits, plus rapides et plus puissants en raison de l'augmentation rapide de leur utilisation dans de nombreuses applications d'ingénierie. Ainsi, le flux de chaleur de ces composants a rapidement augmenté. L'exigence pour l'électronique à grande vitesse est de dissiper plus de chaleur générée pour garantir que la température des puces électroniques est inférieure à la température admissible qui n'est pas garantie dans les techniques de refroidissement traditionnelles. Des températures élevées dues à la chaleur générée dans les processeurs peuvent endommager les composants

Afin de répondre aux exigences en matière de performance, on est appelé à augmenter la surface d'échange en introduisant des ailettes de différentes formes. Ces dernières, offrent de très bonnes solutions en termes d'améliorations du flux de chaleur échangé. Elles sont très utilisées dans les échangeurs de chaleur, les climatiseurs, les aérofrégérants et l'électronique (refroidissement des composants) et elles se présentent sous plusieurs formes géométriques ; rectangulaires, triangulaires, concaves, convexe etc.

Dans ce mémoire, nous avons effectué une simulation numérique par le logiciel COMSOL 5.3 en transitoire 3D pour simuler l'écoulement de l'air dans un canal comprenant un dissipateur thermique à ailettes elliptiques en mousse métallique avec base en aluminium, et composant électronique en silica glass. Ces dissipateurs sont chauffés par le bas par des sources de chaleur à flux imposé. Nous présentons le contenu de ce mémoire en cinq chapitres, répartis comme suit

Dans le premier chapitre nous avons présenté une recherche bibliographique sur le refroidissement des composants électroniques, les travaux de recherche qui ont été étudiés et expérimenté par certains chercheurs.

La deuxième chapitre c'est une généralité sur les mousses métalliques, cette partie introduire les différents types des matériaux cellulaires et expliqué les définitions et bien les différents types des mousses métalliques, et leurs utilisations dans les différents domaines et l'industrie et de la technologie.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des généralités sur le transfert de chaleur et le refroidissement des composants électroniques et ces caractéristiques.

Le quatrième chapitre présente la géométrie d'étude, les hypothèses simplificatrices ainsi que la formulation mathématique des flux d'air, et décrivant les processus de transfert de chaleur à travers un dissipateur thermique à canal rectangulaires en mousse métallique d'aluminium.

Le cinquième chapitre est exposé la simulation numérique 3D utilisé par le logiciel « COMSOL MULTIPHYSIC 5.3 » et les étapes utilisées pour cette simulation.

Et à la fin de ce mémoire une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Revue bibliographique

I.1 Introduction

Le transfert de chaleur par convection dans un canal horizontal équipé de blocs de mousse métallique chauffés est un avantage technologique important. Cela est dû à un large éventail d'applications telles que le refroidissement électronique, les échangeurs de chaleur, la production d'énergie nucléaire, la filtration et la séparation. Le milieu poreux est un milieu efficace améliorant la chaleur En raison du mélange intense du flux et de son grand rapport surface/volume Du fait des structures aléatoires des milieux poreux, ils sont différents dans leur géométrie Propriétés thermiques et physiques. Les mousses métalliques sont une classe de matériaux poreux unique Propriétés utilisées dans les applications de transfert de chaleur et dans de nombreuses formulations.

I.2 Etat bibliographique

Wu et al [1]. Ont étudié la convection mixte en régime laminaire stationnaire dans un canal horizontal contenant des blocks chauffés et une plaque en oblique au-dessus d'un bloc en amont. Les résultats montrent que l'installation de la plaque peut effectivement améliorer les performances de transfert e chaleur et l'instabilité de champ d'écoulement.

Young et al [2]. On simulé le refroidissement par convection forcée bidimensionnelle d'un ensemble de source de chaleur montées sur la paroi inférieure d'un canal, les résultats de cette investigation montrent que la forme et la nature de matériau utilisé pour la source on des effets considérables sur les caractéristiques de l'écoulement et du transfert de chaleur.

M. A. Belmiloud [3]. Ont étudié numériquement le nombre et la hauteur des ailettes d'un dissipateur de chaleur sur le transfert thermique par convection mixte dans une cavité renfermant des composants électroniques. à été menée en exploitant un logiciel sous environnement **IAO** avec un solveur en élément finis. Et les résultats qu'il à obtenus l'augmentation de nombre et la hauteur des chicanes améliorer la quantité de chaleur dégagée par le dissipateur.

Bouttout et al [4]. Ont étudié la convection naturelle bidimensionnelle non stationnaire dans un boîtier rectangulaire contenant des sources de chaleur refroidies par convection. Les résultats montrent que le champ de température dans chaque composant électronique a été trouvé comme étant à peu près uniforme.

Mohamed et al [5]. On simulé la distribution de la chaleur sur une dissipateur de

chaleur utilisant l'outil de simulation Ansys. Afin d'améliorer les performances de refroidissement augmentent ainsi efficacité des puces électroniques.

Driss et al [6]. Ont étudié numériquement et expérimentales la convection forcée de transfert de chaleur à travers des ailettes en **3D** et effectuée par les logiciels solideworks et floworks et les techniques expérimentales de mesure par caméra infrarouge sont déployées. Les résultats obtenus montrent que la géométrie de l'ailette influe considérablement sur le champ thermique et le transfert de chaleur est nettement amélioré.

Buonomo et al [7]. Ont Simulé la convection mixte dans l'air dans un canal chauffé partiellement rempli de mousse d'aluminium. La couche de mousse d'aluminium a été placée sur la plaque inférieure du canal chauffé. Les résultats ont également montré que l'influence des mousses d'aluminium apparaît plus significative pour les valeurs élevées du nombre de Reynolds et le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'existence de la mousse d'aluminium dans le canal. Dans le présent travail, transfert de chaleur par convection mixte dans un canal horizontal alimenté par des blocs de mousse métallique (mousse de cuivre) et exposé à un flux thermique constant, est examiné numériquement avec de l'air comme fluide de travail. L'objectif principal est d'étudier l'effet du transfert de chaleur par convection sur le champ d'écoulement et le transfert de chaleur associé. le champ d'écoulement et le processus de transfert de chaleur associé dans un tel système. L'influence du flux de chaleur l'influence de la variation du flux de chaleur, du nombre de Darcy et du nombre de Reynolds sur les isothermes, les lignes de courant, le vecteur vitesse et le taux de transfert de chaleur au niveau de la chambre de combustion. vecteur vitesse et le taux de transfert de chaleur à la section chauffée en termes de coefficient de transfert de chaleur local et de nombre de Nusselt moyen. de transfert de chaleur local et du nombre de Nusselt moyen sont étudiés et analysés.

Seliman et al [8]. ont élaboré une étude numérique de comparaison entre les performances d'un échangeur simple et celle à conduite garnie d'ailettes contigües. les résultats ont montrées que le gain en transfert de chaleur par rapport aux pertes de charge engendrées est toujours inférieur à celui d'un échangeur à conduite simple sans ailettes.

Une étude numérique ultérieure a été effectuée par **Sparowd et Chermchi [9].** Pour un conduit annulaire à ailettes externes. Les calculs du coefficient de transfert de chaleur ont montré des situations d'augmentation du taux d'échange thermique par rapport au cas sans ailettes.

Agrawal et Sengapta [10]. Ont démontré que l'utilisation d'ailettes dans une conduite annulaire n'est pas indiquée à un nombre de Prandtl inférieur à 2 à cause de la grande chute de pression engendrée.

Huang et Vafai [11]. Ont mené une étude numérique de la convection forcée dans un canal à quatre masses poreuses. Utilisation d'un modèle d'étude Brinkman Forchheimer pour les simulations d'écoulement dans un milieu poreux et l'équation de Navier-Stokes dans une région fluide Et les résultats obtenus ont prouvé l'importance de la chaleur et qu'il est possible d'obtenir un transport accru en ajoutant des masses poreuses.

Hadim [12]. Ont étudié numériquement la convection forcée laminaire dans des pores partiellement ou totalement remplis. Canal avec une section chauffée séparée montée sur le mur inférieur Vous obtiendrez les résultats suivants : le nombre de Nusselt a augmenté lorsque le nombre académique a diminué, le transfert de chaleur était presque égal dans les deux cas (surtout lorsque le nombre académique était faible), et bien la chute de pression était bien moindre dans le canal partiellement rempli.

Al-Rashidi et Chick [13]. Étude numérique de l'amélioration du refroidissement électronique par supplément de mousse à l'aide du modèle Darcy-Brinkmann-Furchheimer. Cette méthode est basée sur l'introduction d'un matériau en mousse sous la forme d'une plaque horizontale décrivant le mouvement des fluides dans la mousse. Les résultats ont montré que la température plus élevée est liée au substrat poreux conducteur, et il a été conclu qu'il existe une amélioration significative de l'état des fluides, même si la perméabilité est moins appréciable.

Kurtbas and Celik [14]. Ils ont étudié le transfert de chaleur par convection mixte dans un canal rectangulaire où le canal est rempli de mousses d'aluminium à cellules ouvertes avec un nombre différent de pores par unité de longueur (**PPI**) avec une constante

Porosité ($\epsilon = 0,93$). Les résultats montrent que le nombre moyen de Nusselt augmente en fonction de la densité des pores et les valeurs plus élevées du nombre de Reynolds et du nombre de Grashoff, le nombre de descendants locaux a augmenté rapidement

Chen et al [15]. Étude numérique de l'amélioration du refroidissement par convection pour un réseau bidimensionnel de plusieurs sections chauffées fixées à la paroi inférieure d'un conduit isolé à l'aide de mousse métallique .Les résultats de l'étude pilote étaient les suivants :

Une augmentation de l'échange de chaleur entre le liquide et le solide entraîne une diminution de l'échange de chaleur entre le liquide et le solide, La différence de température entre les phases liquide et solide de la même valeur que le nombre de Reynolds, car les milieux poreux ont tendance à atteindre l'équilibre thermique local (LTE) avec le liquide Trouver un boost de refroidissement plus élevé pour les clips chauds.

I.3 Conclusion

Plusieurs technologies de refroidissement sont étudiées dans ce chapitre dans le but d'optimiser la transmission de la chaleur et d'améliorer l'efficacité du système de refroidissement. Ces technologies comprennent à la fois le refroidissement par convection naturelle traditionnel et le refroidissement sophistiqué par flux de gaz et de liquide. Pour mieux comprendre les propriétés d'écoulement et le transport de chaleur, les chercheurs ont mené des expériences analytiques, numériques et expérimentales.

De nouvelles approches pour le refroidissement des composants électroniques ont augmenté la transmission de chaleur, selon certaines études. Selon certaines études, cette augmentation est due à une diminution de la viscosité du fluide, tandis que d'autres pensent qu'elle est due à d'autres facteurs. Stmulanon numérique ou comportement thermique d'un dissipateur thermique à microcanaux en mousse métallique.

Chapitre II

**Généralité sur les mousses
métalliques**

II.1 Introduction

Afin d'optimiser le poids d'un composant, les matériaux de faible densité sont très recherchés et l'un des moyens choisis pour les concevoir a été de réduire la quantité de matière solide utilisée dans la fabrication, tout en préservant le dimensionnement géométrique de la structure. Ainsi, des matériaux de type cellulaire ont été fabriqués à partir de métaux en adaptant et en copiant la conception naturelle (liège, mousse, os...). C'est ainsi que les mousses métalliques ont été inventées. Les mousses métalliques possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. De nombreux tests ont également démontré qu'elles possèdent une grande capacité d'absorption d'énergie. En outre, les performances de ces matériaux peuvent être améliorées lorsqu'ils sont assemblés en sandwich avec des fibres de carbone ou d'aramide (kevlar). Cette combinaison a conduit à la fabrication de composites avec un rapport performances mécaniques/poids très intéressant. Aujourd'hui de nombreuses recherches dans des pays tels que les Etats-Unis, Allemagne, le Royaume Unis, le Japon et la France sont en cours car les applications des mousses métalliques sont nombreuses, et laisse entrevoir d'importantes retombées économiques.

II.2 Généralités sur les matériaux cellulaires

II.2.1 Définition

On dit matériau cellulaire métallique ou bien métaux cellulaires, est un corps métallique solide dans lequel il existe des cavités.

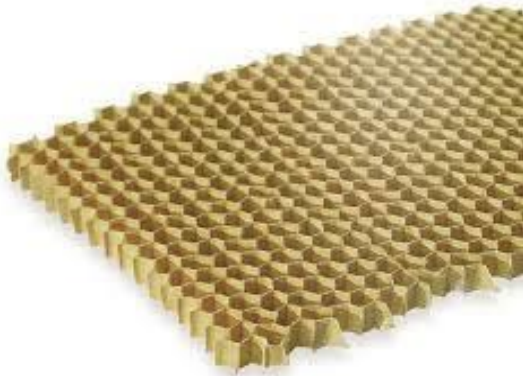
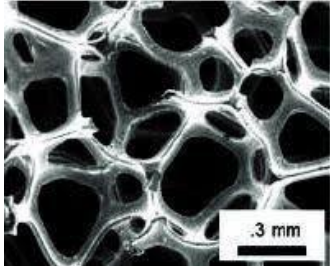

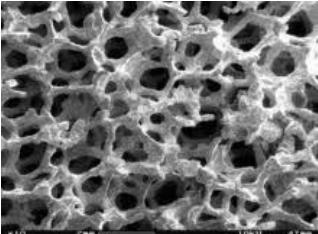
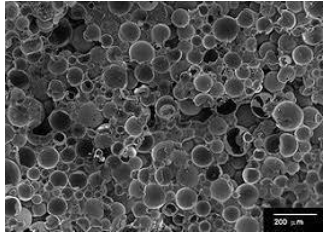
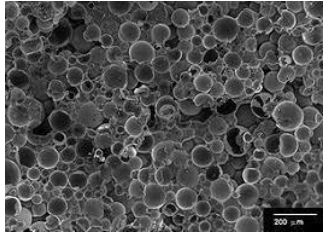
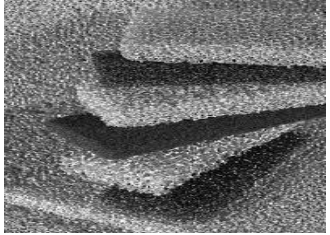
Caractérisés par la distribution à l'échelle mésoscopique de zones cavitaires en leur sein, présentent une grande variété de structures qui diffèrent selon les procédés de mise en œuvre. Pour distinguer les spécificités propres à chacune, il est nécessaire d'employer un vocabulaire qui leur est adapté. Dans ce qui suit, nous proposons quelques définitions de termes spécifiques au domaine des métaux cellulaires [16].

II.2.2 Les types des matériaux cellulaires

- *Structure périodique* : structure dans laquelle l'ordonnement de la matière peut être décrit par duplication d'un motif élémentaire.
- *Structure stochastique* : structure dans laquelle la répartition de la matière est aléatoire et continue. Cette répartition peut néanmoins être décrite de façon statistique.

- *Métal poreux* : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont globalement sphériques, isolées les unes des autres et représentent en général moins de 70% du volume du matériau.
- *Mousse syntactique* : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont sphériques et interconnectées entre elles.
- *Eponge métallique* : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont interconnectées entre elles et dans lequel le métal se répartit sous forme de ligaments
- *Mousse métallique* : métal cellulaire provenant de la solidification d'une mousse métallique liquide, c'est-à-dire d'un mélange liquide-gaz métastable. Les produits obtenus de cette manière présentent des cavités isolées les unes des autres, globalement polyédriques et séparées par des cloisons fines, appelées films.
- *Nid-d'abeilles* : métal cellulaire dont la structure, souvent périodique, se définit dans un plan.
- *Treillis métallique* : métal cellulaire fait de poutres interconnectées entre elles qui forment un réseau, le plus souvent périodique, dans lequel l'agencement de la matière est déterministe [16].

Tableau (II.1) : Différents métaux cellulaires existant

Matériaux cellulaires...	
À structure périodique	À structure stochastique
 Nid-d'abeilles	 Éponge
 Trellis métallique	 Mousse métallique
	 Mousse stochastique
	 Mousse syntactique
	 Mousse métallique

II.3 Définition d'une mousse métallique

Les mousses métalliques sont des matériaux métalliques cellulaires décrits comme un ensemble de cellules vides, chacune étant entourée par des arêtes ou des parois solides pouvant contenir jusqu'à 95 % de vide, (figure II.2) [17].

Sa structure est faite de pores reliés ensemble sous forme d'une mousse ouverte, ou isolés, donnant lieu à une mousse à cellule fermée, faite en cellule séparé qui emprisonne le gaz à l'intérieur [18].

On trouve dans la nature les matériaux cellulaires comme le bois, os, corail, le liège, et comme d'autres matériaux de construction biologique, qui montrent une configuration cellulaire de leur structure hiérarchique [20].

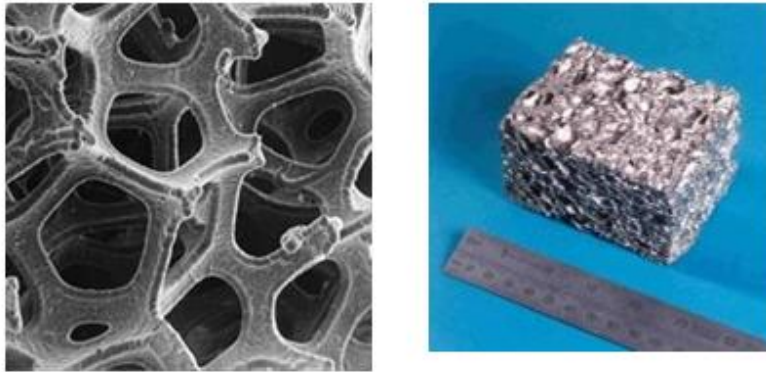


Figure (II.1): Photographie d'une mousse métallique à cellule ouverte [20] et [21].

Plusieurs solutés peuvent être écume, comme les polymères et les verres, les céramiques et même des matériaux comme le nickel et l'aluminium.

Parmi les matériaux cellulaires, les mousses synthétiques, et les mousses polymériques sont actuellement les plus importantes car leurs applications est répondues dans presque leurs combinaison extraordinaire chaque secteur de technologie [19]. Leurs combinaisons extraordinaires offrent des propriétés intéressantes comme leur haute rigidité, leur résistance aux feux, atténuation acoustique et leur réutilisation facile (figure II.1).

Les mousses métalliques constituent une nouvelle classe de matériaux très prometteuse. Les premières tentatives d'élaboration de mousse remontent aux années 1960. A cette époque l'intérêt pour cette classe de matériaux n'a pas été suffisamment grand pour entreprendre une production à l'échelle industrielle. C'est durant les deux dernières décennies que le développement de mousses métalliques a connu ses plus grandes avancées en termes de qualité de produits et rentabilité des procédés de fabrication. On peut trouver actuellement sur le marché des mousses de différents types de métaux et alliage comme l'aluminium, le zinc, le cuivre, et le nickel [24].

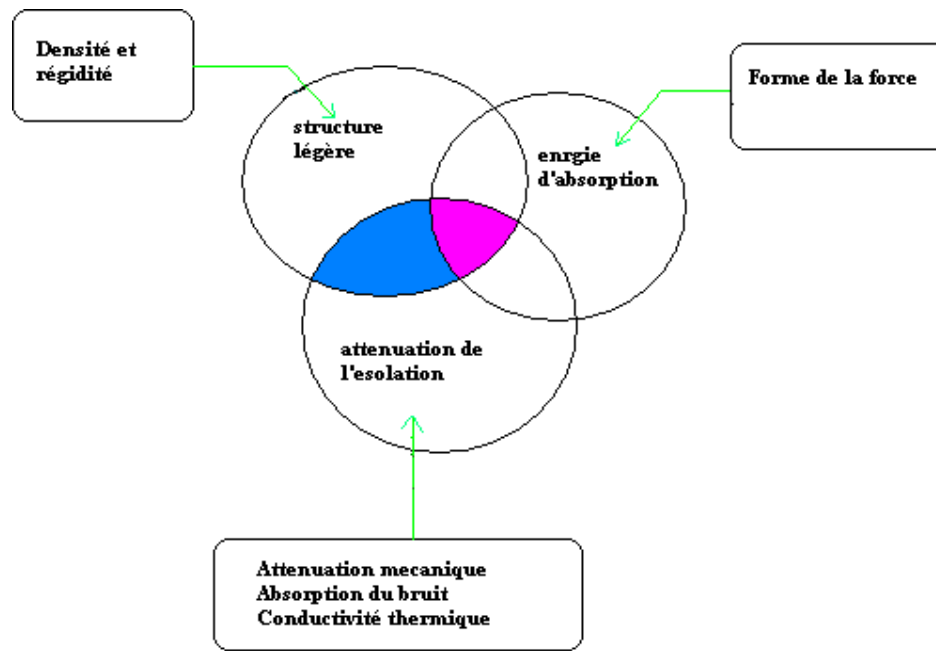


Figure (II.2): Schéma montrant les principales applications des mousses métalliques [22, 23].

II.4 Les différents types de mousse métalliques

On distingue 4 types de mousses métalliques [25]:

- Mousses métalliques à pores ouverts.
- Mousses métalliques à pores fermées.
- Mousses métalliques régulières.
- Mousses métalliques stochastiques.

II.4.1 Mousses métalliques à pores ouverts

Les mousses à pores ouverts peuvent être obtenues par plusieurs moyens. Jusqu'à présent, les plus connues sont les mousses de réplique qui utilisent des mousses de polyuréthane à cellule ouvertes

Les domaines d'application sont très vastes comme les échangeurs de chaleur compacts (refroidissement de composants électroniques, échangeurs de chaleur PCM), l'absorption, la diffusion de flux optique et légers. En raison du coût élevé de la matière dont elle est le plus souvent utilisée dans la technologie de pointe, de l'aérospatiale et de la fabrication. Extrêmement fine échelle mousses à cellules ouvertes, avec des cellules trop

petites pour être visibles à l'œil nu, sont utilisés comme filtres à haute température dans l'industrie chimique.

Les mousses à pores ouverts présentent des cellules connectées. La structure géométrique d'une mousse ouverte est généralement plus complexe que celle des mousses à cellules fermées [26].

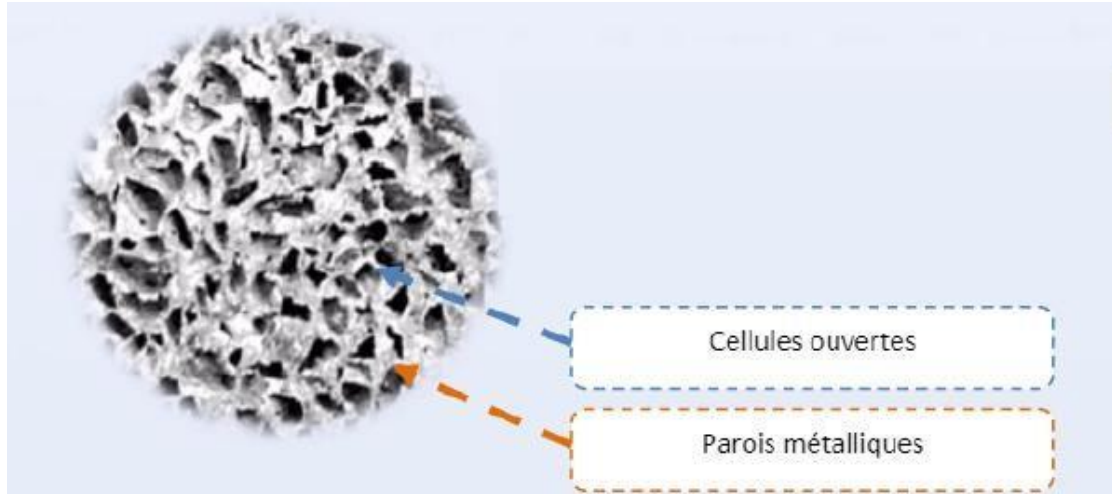


Figure (II.3) : Mousse métallique à pores ouvertes.

II.4.2 Mousses métalliques à pores fermés

Les mousses métalliques à cellules fermées ont été élaborées en 1926 par Mêler dans un brevet français où des métaux légers sont moussés, soit par injection de gaz inerte, soit par agent gonflant. Les deux brevets sur des mousses métalliques ont été délivrés à Benjamin Sosnik en 1948 et 1951, qui utilisaient de la vapeur de mercure pour souffler de l'aluminium liquide. Ensuite, les mousses métalliques à cellules fermées ont été développées depuis 1956 par John C. Elliott Research Laboratories Bjorksten. Bien que les premiers prototypes étaient disponibles dans les années 1950, la production commerciale a seulement commencé dans les années 1990 par la société Shinko Wire au Japon. Les mousses métalliques à cellules fermées sont principalement utilisées comme un matériau absorbant l'impact, comme les mousses de polymères dans un casque de vélo, mais pour des charges d'impact élevées. Contrairement à beaucoup de mousses polymères, les mousses métalliques restent [26].

Les mousses à pores fermés se caractérisent par leurs cellules sphériques isolées par des parois souvent épaisses [25].

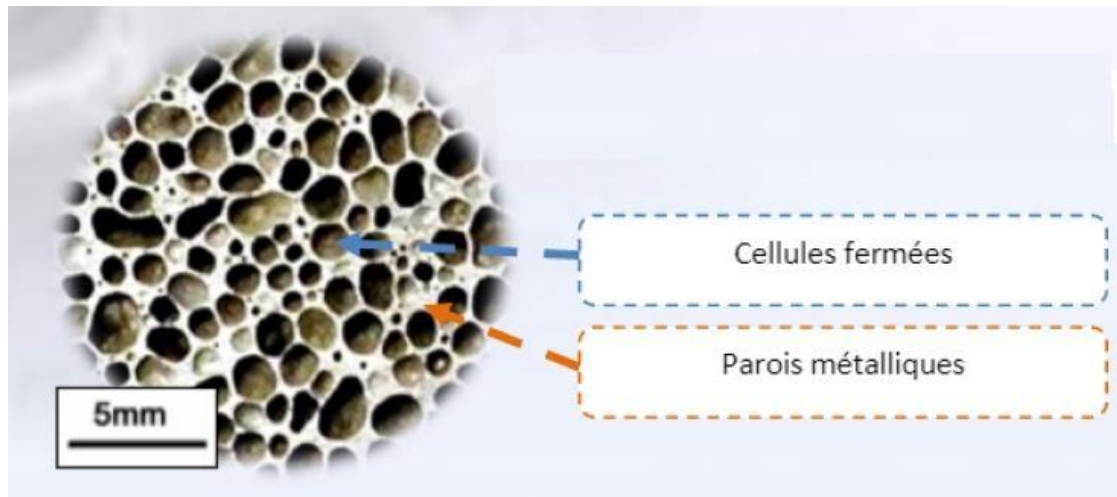


Figure (II.4) : Mousse métallique à pores fermées.

II.4.3 Mousse métalliques régulière

Une mousse est dite régulière lorsque la structure est ordonnée. À ce jour, seule la technique mise au point par *CTIF* (Centre technique des industries de la fonderie) permet la fabrication d'une mousse régulière. Il s'agit d'un moulage par fonderie en méthode directe qui permet d'obtenir une mousse à pore régulière et ouverte.

Pour fabriquer cette mousse, des plaques en sable aggloméré sont utilisés comme noyaux de fonderie. Leur forme est étudiée pour chaque application. Le savoir-faire lié à cette technique consiste en la conception des plaques et l'infiltration du métal liquide à l'intérieur du réseau créé.

Ce mode de fabrication permet de réaliser des mousses dites "parfaites", c'est-à-dire qu'elles respectent les conditions de Plateau notamment en réalisant des pores de la forme d'un octaèdre tronqué de Kelvin (conjecture de Kelvin).

De nombreux travaux ont été menés par *CTIF* pour identifier les applications possibles de cette technologie et concevoir les outils méthodologiques pour mieux comprendre et simuler le comportement des mousses [26].

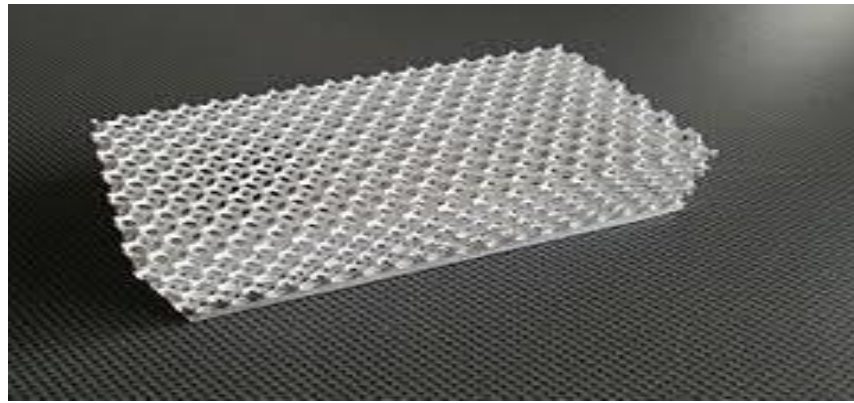


Figure (II.5) : Mousse métallique régulière.

II.4.4 Mousses stochastiques

Une mousse dite stochastique lorsque la répartition de la porosité est aléatoire. La majeure partie des mousses sont stochastiques car leur fabrication relève soit [26]:

- Du moussage du métal qu'il soit liquide ou solide (poudre)
- Du dépôt de vapeur par CVD (sur une matrice elle-même aléatoire)
- Du moulage direct ou indirect d'un moule contenant des billes ou une matrice elle-même aléatoire.



Figure (II.6) : Mousse métallique stochastique.

II.5 Propriétés géométriques des mousses métalliques

II.5.1 La porosité

La porosité, ε , caractérise la porosité d'un matériau à être composé à la fois d'une phase solide et d'une phase fluide. Elle exprime le pourcentage du vide généralement occupé par l'air (phase fluide) par rapport à la matrice solide (phase solide) (figure II.7) [27].

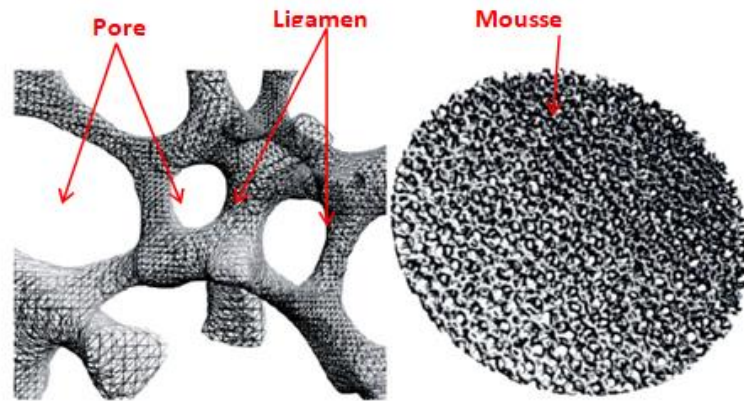


Figure (II.7) : Présentation d'une mousse métallique à pores ouverts.

II.5.2 Diamètre de pore

De manière générale, le concept de « taille de pore » est extrêmement délicat à définir. Si l'observation visuelle permet de délimiter aisément les cellules, leur mesure précise nécessite la mise en place de techniques 3D spécifiques. Le diamètre du pore d_p est le diamètre moyen des cellules présentes de la mousse. [27]

II.5.3 Surface spécifique

La surface spécifique désigne la superficie réelle d'un objet par opposition à sa surface apparente, rapportée au volume total de l'objet.

La surface spécifique S_p correspond à la surface géométrique du solide en contact avec la porosité ouverte. Elle s'exprime en $(m^2.m^{-3})$. En outre, elle correspond directement à la surface de frottement entre la phase solide et la phase fluide en écoulement. De ce point de vue, la surface spécifique apparaît comme étant un paramètre fondamental de la structure du milieu poreux lorsque l'on étudie l'aspect écoulement du matériau. [27]

II.6 Procédés de fabrication des mousses métalliques

La fabrication des mousses métalliques est assez empirique, et les recettes sont confidentielles. Du fait de son point de fusion assez bas (650°C), l'aluminium est l'ingrédient idéal pour fabriquer des mousses métalliques. Quant au procédé, on connaît aujourd'hui au moins trois voies de fabrication [28] :

II.6.1 voie gazeuse

Condensation de vapeurs métalliques avec mousses polymères, puis destruction des mousses.

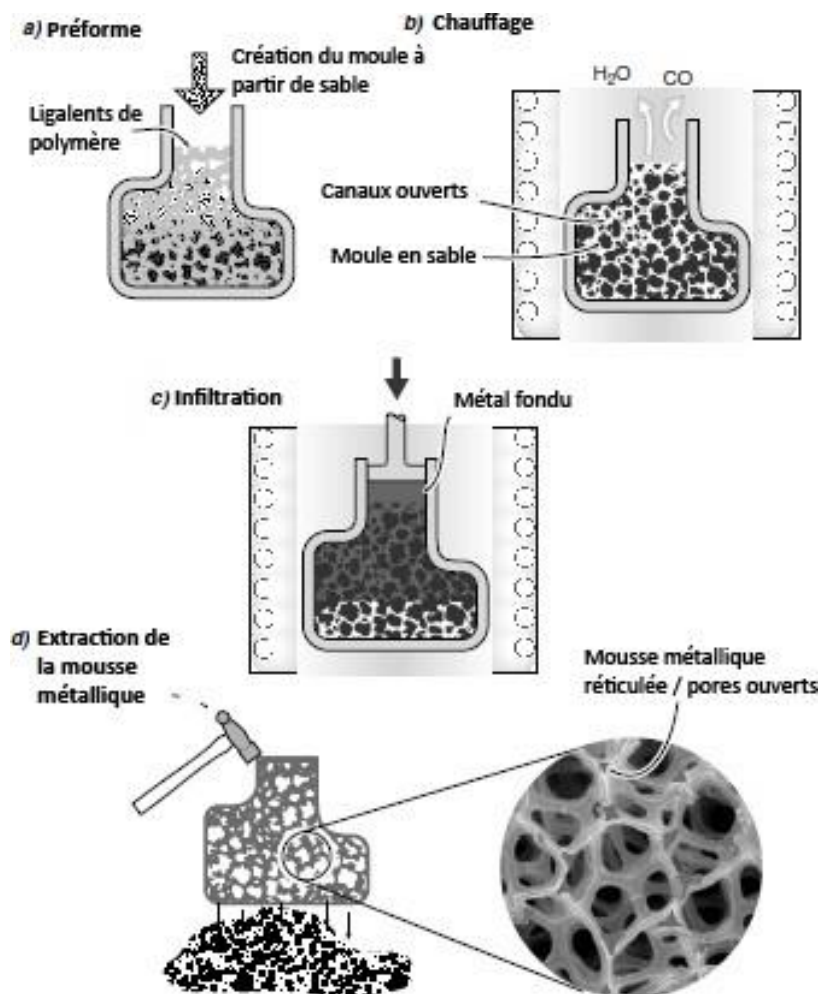


Figure (II.8) : Procédé de fabrication de mousse par voie gazeuse.

II.6.2 Voie liquide

Moulage et élimination d'une préforme on peut par exemple fritter un mélange de poudre de sel pour s'en servir de préforme, l'infiltrer avec de l'aluminium fondu puis éliminer le sel par simple dissolution dans l'eau.

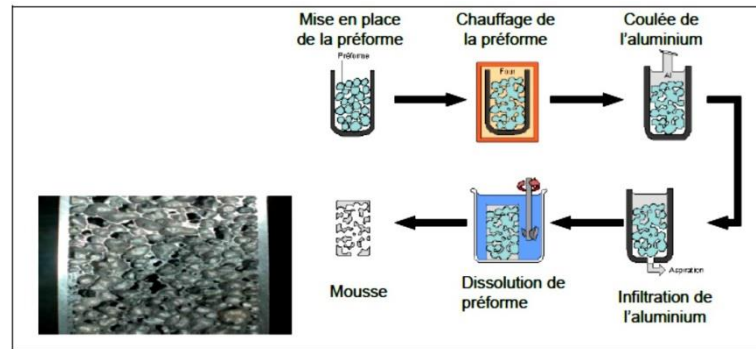


Figure (II.9) : Procédé de fabrication de mousse par voie liquide.

II.6.3 Voie solide

L'aluminium en poudre est mélangé à un agent dégagant du gaz à haute température (hydrure de titane ou de zirconium); le mélange est extrudé puis chauffée vers 600°C ; l'argent gazant libère alors son hydrogène qui forme les cellules de la mousse en gonflant l'aluminium dans son état semi solide à cette température.

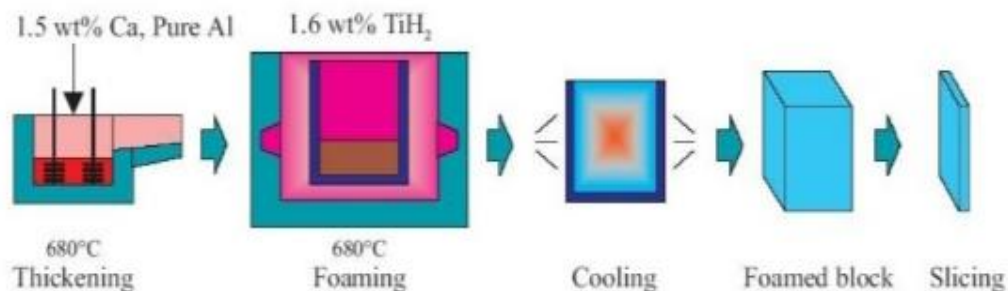


Figure (II.10) : Procédé de fabrication de mousse par voie solide.

Les méthodes qui utilisent le métal fondu pourraient tirer parti du système de coulée continue en métallurgie. Les technologies avec poudres, beaucoup plus chères, permettraient au contraire de produire des pièces plus complexes en plus petite série. Elle consiste à emprisonner de la poudre d'aluminium additionnée d'agent moussant entre deux tôles du

même métal. L'ensemble est étiré puis mis à la forme de la pièce dans un four, la réaction se déclenche et la mousse se forme in situ, produisant un véritable "sandwich". Selon les techniques et les variantes on obtiendra des pièces à porosité ouvert ou fermé.

II.7 Les avantages et domaines d'utilisation des mousses

II.7.1 Propriétés et avantage des mousses

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

- Une légèreté (le matériau est constitué de 90% d'air) ;
- Une grande surface d'échange spécifique ;
- Une résistance aux environnements hostiles (hautes températures, humidité et corrosion selon les métaux et céramiques utilisés) ;
- Un grand rapport résistance par rapport au poids ;
- Une bonne absorption d'énergie lors d'impacts ;
- L'excellente propriété acoustique (facteur de perte dans la gamme des fréquences audites), donc une atténuation du son, L'excellente capacité de protection électromagnétique (amortissement) ;
- Une Faible conductivité thermique et électrique;
- Un matériau recyclable ;
- une forme innovatrice.

Les caractéristiques des mousses font varier leurs propriétés, à savoir la composition chimique de l'alliage utilisé, le taux et le type de porosité (ouverte ou fermé), et le traitement thermique utilisé.

Toutefois un inconvénient principal est rencontré lors de l'utilisation des mousses, les propriétés mécaniques et les performances de la mousse à la compression ne dépassent pas 10-15 MPA pour AL en fonction de la densité [29].

II.7.2 Domaine d'application des mousses métalliques

La mousse est un matériau très intéressante, qui offre une très grande polyvalence pour leurs utilisations, on les utilise dans beaucoup de domaines d'ingénierie: mécaniques, aéronautiques, chimiques et aussi médicaux. Pour ces raisons, elles sont utilisées dans de nombreuses applications telles que [29]:

- Les structures porteuses de catalyseur ;
- Le système antibuée ;
- L'électrode pour batteries ;
- L'électrode pour électrolyse ;
- Les électrodes pour citerne de carburant ;
- L'évaporateur;
- Les filtres ;
- L'intercepteur de flamme ;
- Les Redresseurs et diviseurs d'écoulement et débit (pour canalisations de gaz, liquides, intérêt spécifique au processus de refroidissement de fibres) ;
- L'échangeur de chaleur ;
- Les radiateurs de chaleur ;
- Les silencieux pour vannes de contrôle (détendeurs de pression), sous forme de garnitures ou d'inserts ;
- Les brûleurs à gaz pré-mélangé ;
- Les atomiseurs rotatifs pour atomisation ultra fine ;
- Le pare-étincelles (moteurs diesel) ;
- Les silencieux (d'échappement, de type restrictif, atténuateurs) ;
- Les absorbeurs et défecteurs d'ultrasons, et beaucoup d'autres applications.

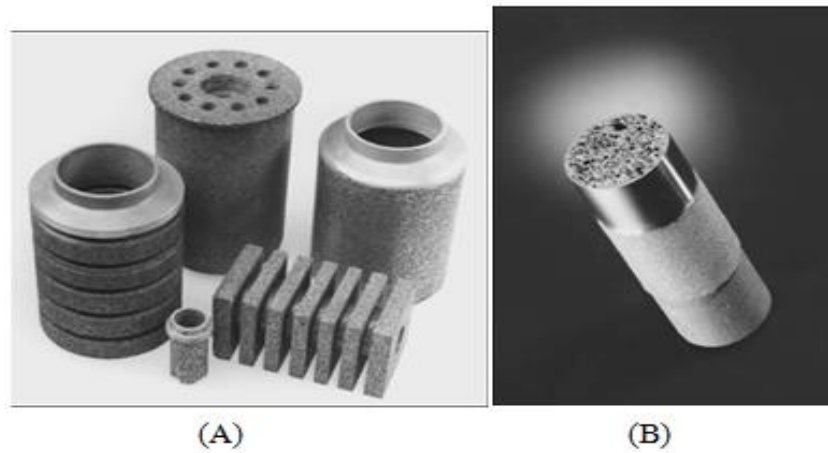


Figure (II.11): Plusieurs échangeurs de chaleur sur la photo (A) et un filtre sur la figure (B) [22].

Grâce à cet ensemble de caractéristiques uniques, les mousses métalliques peuvent répondre à des besoins dans une variété d'application. Néanmoins, les mousses métalliques visent dans un premier temps la gestion des flux thermiques en électronique en fournissant des composants critiques ayant des avantages indéniables et la performance de plusieurs produits, tels que : [29]

- Des structures de capillarité en mousse métallique pour des conduites cylindriques, plats et en boucle performants dans n'importe quelle orientation ;
- Des plaques d'évaporation servant à évaporer efficacement les liquides contenus dans les chambres de vapeurs ;
- Les électrodes poreuses qui augmentent l'efficacité des réactions électrochimiques grâce à leur importante surface d'échange et les batteries rechargeables à plusieurs reprises (Figure II.12);
- La purification d'eau par des mousses de cuivre-argent, en effet ces deux métaux sont reconnus pour leurs actions bactéricide et anti algues;
- L'acoustique dans les environnements hostiles, notamment lorsque les températures sont élevées et en présence d'humidité.

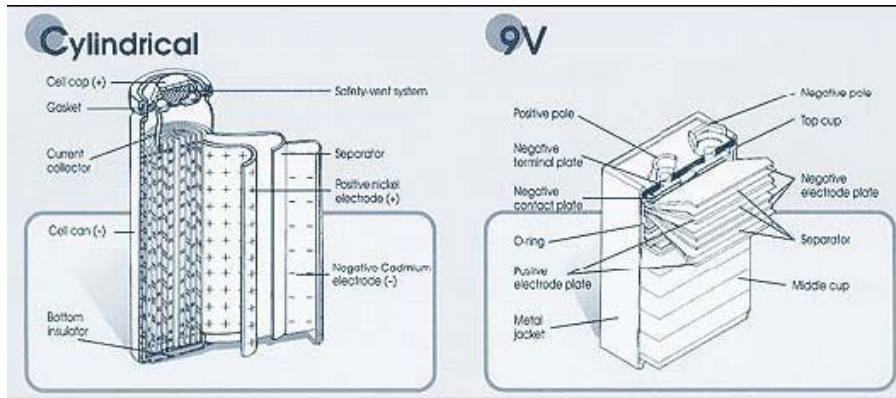


Figure (II.12): Schéma constitutif d'une batterie rechargeable en NI-cd.

Les applications dans les systèmes impact-absorbants offrent probablement le plus grand potentiel pour les mousses métalliques, voir figure (II-3). Leur capacité exceptionnelle d'absorber de grandes quantités d'énergie à la pression presque constante suggère des applications s'étendant des butoirs d'automobile aux enregistreurs d'accident d'avion [29].

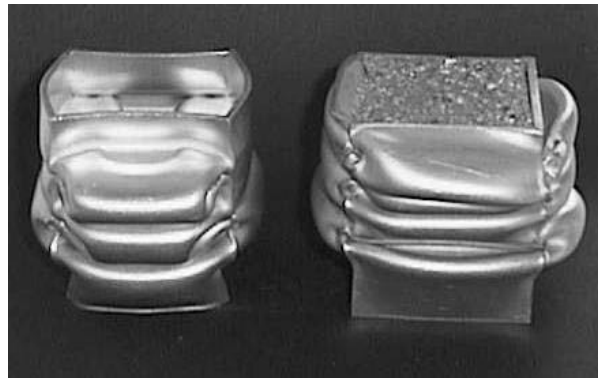


Figure (II.13): Production d'une mousse par l'addition d'une phase volatile.

Les propriétés acoustiques de métallique écumé le moyen qu'elles trouvent des utilisations dans beaucoup d'endroits où l'absorption saine est essentielle, comme par exemple lelong des côtés d'une route pour réduire le trafic ébruité.

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



Figure (II.14): Des poutres en mousse qui servent à arrêter les flammes.

Quelques mousses représentent des structures cellulaires extrêmement poreuses. De ce fait, leurs propriétés présentent un intérêt majeur pour des applications industrielles telles que les échangeurs de chaleur et les absorbeurs d'énergie (figure II-5). Elles sont en effet ductiles, conductrices, ont une grande capacité de soudure et ont un potentiel très grand dans les technologies des polymères [29].

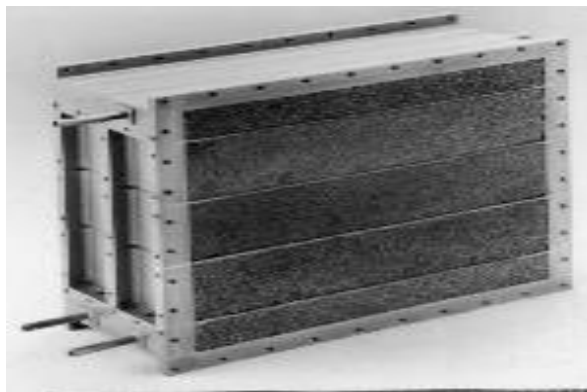


Figure (II.15): Photo d'un échangeur de chaleur conçu avec de la mousse de cuivre.

Pour l'heure les ordinateurs surchauffent très facilement, la technologie de la mousse métallique sera surtout utilisée dans les serveurs à haute densité de puissance, Ce genre de serveurs que les entreprises confinent dans une pièce climatisée tellement ils génèrent de la chaleur, le marché des ordinateurs personnel viendra sans doute plus tard.

Les mousses métalliques ont une haute rigidité et une faible densité que le matériau de parent, bonne force de cisaillement, de rupture et sont idéal pour la construction stratifiée (Figure II.16), elles trouvent leurs parfaites valorisations dans les structures sandwich dont ils forment le cœur enserré de 2 plaques d'Aluminium. Ces constructions stratifiées ont été produites ou la mousse sert de nid d'abeille, emballé entre le plat externe plein, elles sont plus facile à produire en série, et ont augmenté la résistance pour cisailier en raison de la nature isotopique du métal écumé [29].

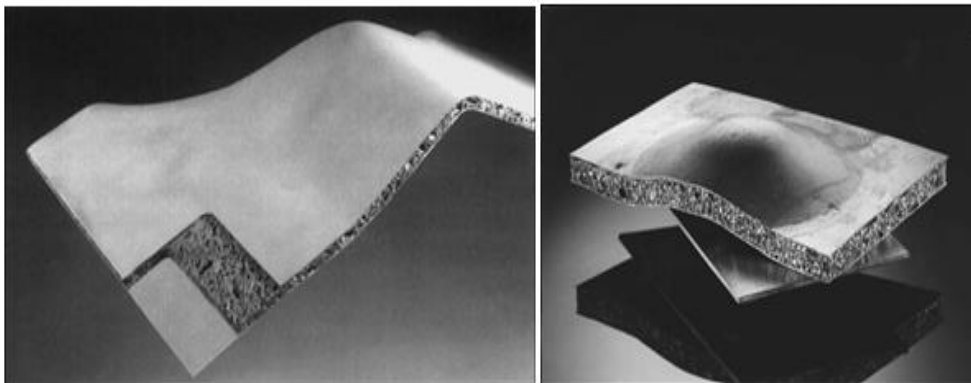


Figure (II.16): Photos des mousses en forme sandwich [22].

L'intérêt de la mousse métallique devient évident lorsque des tensions de pliage sont considérées en fonction du poids, la distribution de la masse des structures cellulaires augmente le moment global de l'inertie du matériel, et donnant une rigidité à la flexion et une résistance spécifique bien plus haute que pour le poids correspondant du métal en bloc voici un exemple montré sur les figures respectives (II-7) et (II-8). [29]



Figure (II.17): Base d'un bras de levage fait à partir des panneaux de sandwich (AFS, GmbH à Sarrebruck, Allemagne).

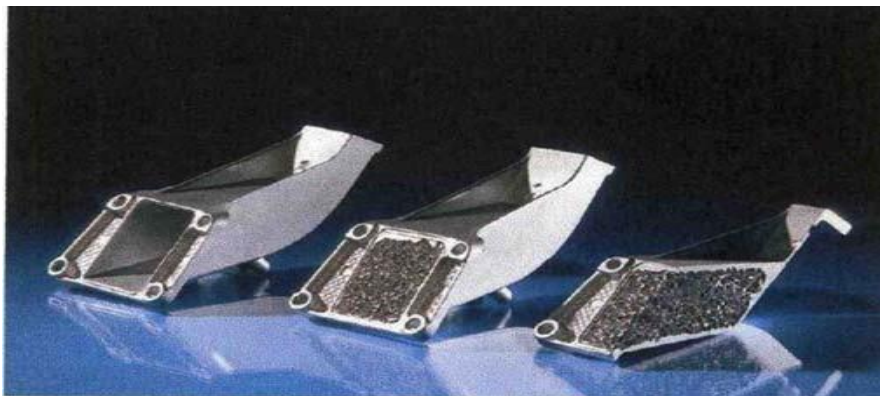


Figure (II.18): Prototype d'un support moteur BMW construit par LKRE (Ranshofen, Autriche).

En électrochimie pour produire de l'hydrogène, en biomédicale pour produire l'équivalent de la moelle osseuse dans certaines prothèses comme filtre pour assainir ou tuer les bactéries dans l'eau, etc.

Ces mousses ont de nombreuses applications pratiques en médecine, parce qu'elles contribuent à réparer ou à remplacer les os et les tissus, elles peuvent être utiles dans le traitement des troubles musculo squelettiques comme l'ostéoarthrite, la tendinite ou les problèmes de joints. Elles peuvent servir dans les prothèses dentaires ou orthopédiques comme les remplacements de hanches ou de genoux. [29]

De plus, l'utilisation des mousses métalliques permet des économies! Il est en effet

beaucoup moins coûteux de fabriquer ces appareils que de pratiquer sur un patient de multiples interventions, suivies de réadaptation postopératoire. En étendant l'usage des prothèses en mousse métallique, l'impact économique de ces problèmes de santé peut être diminué.

Les mousses métalliques sont donc excellentes pour usage médical. Elles sont très adaptables et on peut en fabriquer différentes choses, comme des formes complexes, des recouvrements pour d'autres structures ou des structures entièrement poreuses. Les médicaments et les facteurs affectant la croissance peuvent également être placés dans la structure de mousse.

La structure de ces mousses ressemble beaucoup à de l'os véritable. Les similitudes assurent la (biocompatibilité), ce qui veut dire que la prothèse en mousse s'adaptera et fonctionnera à l'intérieur du corps, c'est important parce que, autrement, une prothèse peut se relâcher, la figure (II-8) nous montre ce type de prothèse [29].

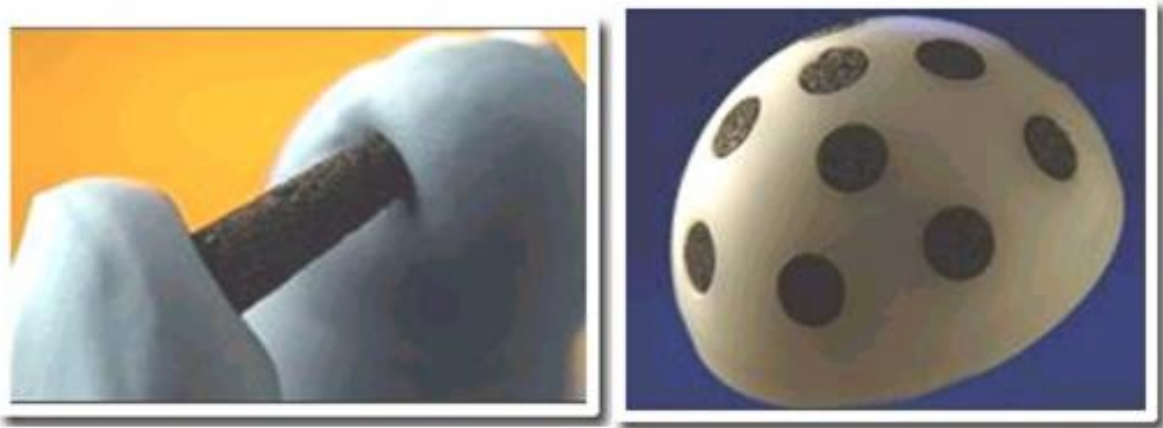


Figure (II.19): Prototype de système d'ancrage poreux pour implants dentaires et de hanches en titane.

II.8 Conclusion

Ce chapitre présente les matériaux cellulaires sur lequel nous débutons par une description qualitative du matériau (mousse) dans toute sa diversité et focalisons vers la catégorie de mousse métallique que nous allons caractériser. Nous parcourons les techniques d'élaboration les plus classiques et présentons quelques-uns des avantages et propriétés. Enfin nous terminons par ces domaines applicatifs.

Chapitre III

Refroidissement des composantes électriques

III.1 L'introduction

C'est depuis plus d'un siècle que les scientifiques étudient les écoulements avec transfert de chaleur, par ces différents modes (Conduction, Convection et Rayonnement). Ces écoulements sont étudiés à travers des géométries connues, en raison de leurs applications pratiques telles que les systèmes électroniques, les échangeurs de chaleur de haute performance, les équipements des procédés chimiques etc...

Avec le développement de l'électronique, les composants électroniques deviennent de plus en plus petits et libèrent de plus en plus de chaleur, cette chaleur doit être évacuée de manière efficace et rapide. Les performances des composants électroniques diminuent fortement avec l'augmentation de leur température.

III.2 Les transferts de chaleur

On définit le transfert de chaleur comme de l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température. On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, réacteurs, échangeurs de chaleur, colonnes à distiller, chambres froides, presses à injection, coulée des métaux...) que dans notre vie quotidienne (le chauffage et l'isolation de la maison, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver et le facteur de refroidissement éolien, le coup de soleil sur la plage...).

Trois processus physiques permettent le transfert de chaleur d'un corps à l'autre lorsqu'ils ne sont pas en équilibre thermique (à des températures différentes) : la conduction, le rayonnement et la convection

III.2.1 La conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque.[39]

III.2.2 La convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle, généralement d'un fluide d'une région à autre. On distingue deux types de convection ; la convection naturelle où

le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques. [39]

III.2.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel. En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel. [39]

III.3 Les ailettes

Le domaine de l'intensification des échangeurs de chaleur a depuis de nombreuses années dépassé le stade du laboratoire et a été largement pris en compte dans les applications industrielles. Nombre d'échangeurs dans des procédés très divers sont équipés de surfaces d'échange (tubes ou plaques ailettes) spécialement conçues pour présenter des coefficients d'échange de chaleur élevés et notamment supérieurs à ceux des surfaces d'échange lisses.

III.3.1 Échangeurs à tubes ailettes

Lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère nettement moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes s'impose autour des tubes ou quelquefois dans les tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas principalement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique. Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons : [32]

III.3.1.1 Ailettes transversales

On ne considère que les ailettes extérieures aux tubes ; elles peuvent être continues ou indépendantes (figure III.1).

Les ailettes continues sont traversées par plusieurs tubes. De forme généralement rectangulaire, elles sont souvent fabriquées par emboutissage puis fixées par dilatation des tubes. Un collet fixe l'écartement entre les ailettes. Elles peuvent être planes ou ondulées ; l'ondulation provoque une perturbation de l'écoulement qui améliore l'échange

thermique.

Les ailettes indépendantes sont traversées par un seul tube. Elles peuvent être pleines ou segmentées. Les ailettes indépendantes peuvent être de différentes sortes :

- ailettes annulaires, en principe des ailettes pleines (figure III.2.a) ;
- ailette hélicoïdale (spiralée) (figure III.2.b), pleine ou segmentée, bien adaptée aux grandes longueurs de tubes. Elle est généralement obtenue par enroulement d'un ruban serti ou soudé sur le tube. Si la hauteur de l'ailette est grande devant le rayon du tube, l'ailette est segmentée.

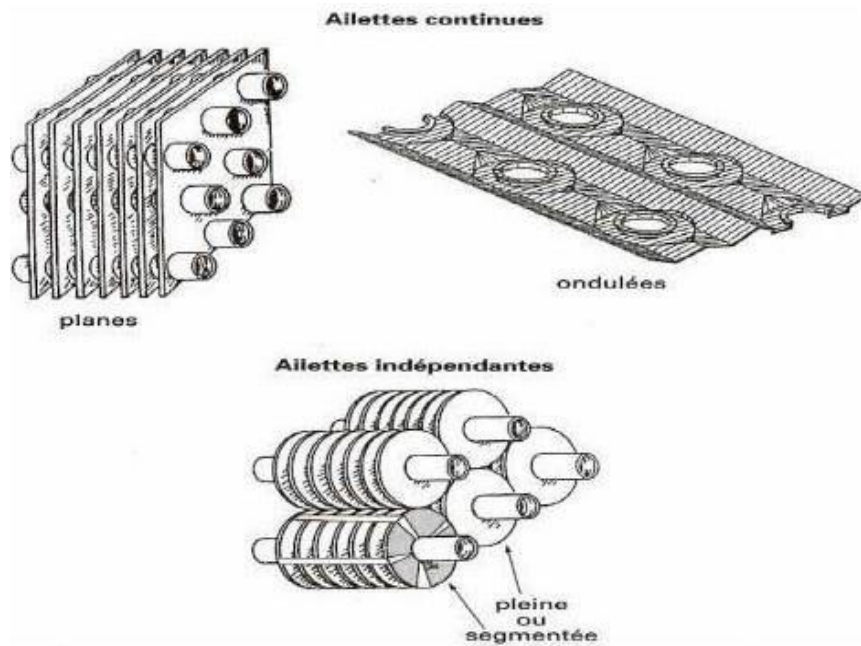


Figure III.1 : Ailettes continues et ailettes indépendantes pour tubes

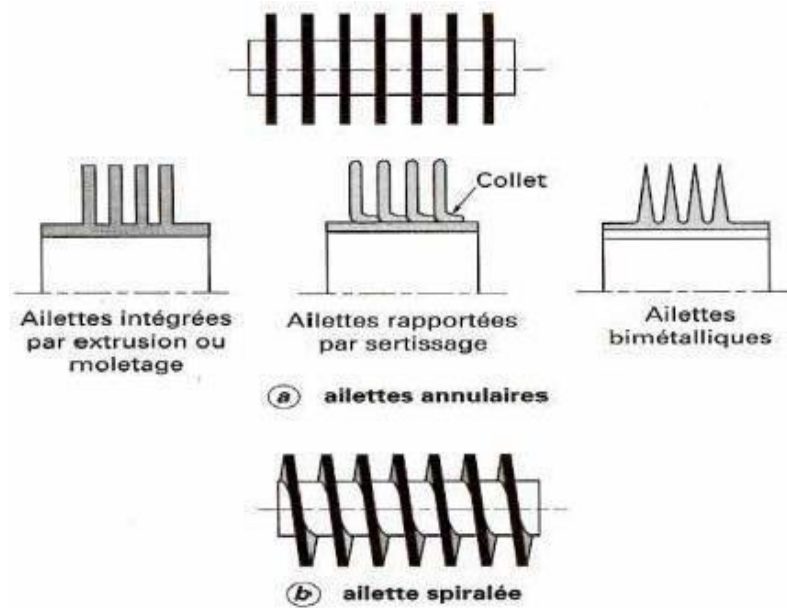


Figure III.2 : Ailettes annulaires et ailettes spiralées.

III.3.1.2 Ailettes longitudinales

Les ailettes sont disposées suivant l'axe des tubes (figure III.3) ; elles peuvent être situées à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes. Pour améliorer le transfert de chaleur, elles sont quelquefois localement torsadées.[40]

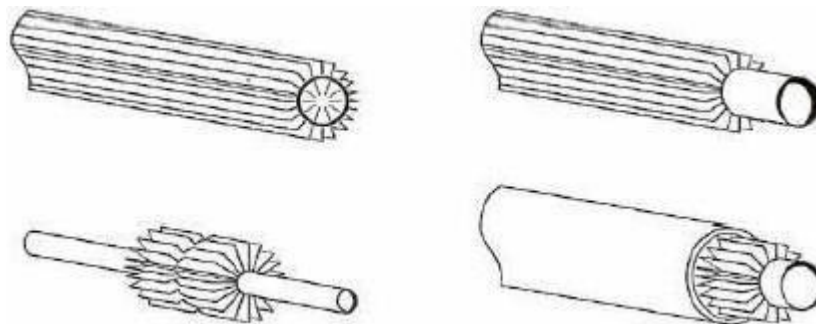


Figure III.3 : Tubes avec différents types d'ailettes longitudinales.

III.4 Le dissipateur de chaleur électronique

III.4.1 Définition

Un dissipateur de chaleur (également un dissipateur de chaleur couramment orthographié) est un échangeur de chaleur passif qui transfère la chaleur générée par un

dispositif électronique ou mécanique à un milieu fluide, souvent de l'air ou un liquide de refroidissement liquide, où il est dissipé à l'écart du dispositif, Permettant ainsi la régulation de la température de l'appareil à des niveaux optimaux. Un dissipateur de chaleur est conçu pour maximiser sa surface en contact avec le fluide de refroidissement qui l'entoure, comme l'air. La vitesse de l'air, le choix du matériau, la conception de la protrusion et le traitement de surface sont des facteurs qui influent sur la performance d'un dissipateur de chaleur. Le cuivre est utilisé car il présente de nombreuses propriétés souhaitables pour les échangeurs de chaleur thermiquement efficaces et durables.



Figure III.4 : Un dissipateur de chaleur refroidi par ventilateur sur le processeur d'un ordinateur personnel. À droite, un dissipateur de chaleur plus petit refroidit un autre circuit intégré de la carte mère.

III.4.2 Le principe de dissipateur de chaleur

Un dissipateur de chaleur transfère l'énergie thermique d'un appareil à température plus élevée à un fluide à température inférieure. Le milieu fluide est souvent de l'air, mais peut également être de l'eau, des fluides frigorigènes ou de l'huile. Si le milieu fluide est de l'eau, le dissipateur de chaleur est souvent appelé une plaque froide. Dans la thermodynamique, un dissipateur de chaleur est un réservoir de chaleur qui peut absorber une quantité arbitraire de chaleur sans changer de température de manière significative. Les dissipateurs de chaleur pratiques pour les appareils électroniques doivent avoir une température supérieure à l'environnement pour transférer la chaleur par convection, rayonnement et conduction. Les alimentations électriques ne sont pas

efficaces à **100%**, ce qui entraîne une chaleur supplémentaire qui peut nuire à la fonction de l'appareil. En tant que tel, un dissipateur de chaleur est inclus dans la conception pour disperser la chaleur pour améliorer la consommation d'énergie efficace. [30]

III.4.3 Les différents types de dissipateur de chaleur

Les dissipateurs thermiques sont classés en différentes catégories en fonction de différents critères. Considérons les principaux types, à savoir les dissipateurs thermiques actifs et les dissipateurs thermiques passifs.

III.4.3.1 Dissipateurs de chaleur actifs

Ceux-ci sont généralement de type ventilateur et utilisent l'alimentation à des fins de refroidissement. Ils peuvent également être appelés dissipateur de chaleur ou ventilateurs. Les ventilateurs sont en outre classés en type à roulement à billes et à roulement à manchon. Les ventilateurs de moteur à roulement à billes sont préférés car leur durée de fonctionnement est plus longue et ils sont moins chers lorsqu'il s'agit d'une utilisation à longue portée. Les performances de ces types de dissipateurs thermiques sont excellentes, mais pas pour les applications à long terme car ils se composent de pièces mobiles et sont un peu chers aussi. [31]



Figure III.5 : dissipateur de chaleur actif

III.4.3.2 Dissipateurs de chaleur passifs

Ceux-ci ne possèdent aucun composant mécanique et sont constitués de radiateurs à ailettes en aluminium. Ceux-ci dissipent l'énergie thermique ou la chaleur en utilisant le processus de convection. Ceux-ci sont plus fiables que les dissipateurs de chaleur actifs ; et, pour un fonctionnement efficace des dissipateurs thermiques passifs, il est recommandé de maintenir un flux d'air continu à travers leurs ailettes. [31]



Figure III.6 : dissipateur de chaleur passif

III.4.3.3 Dissipateur de chaleur en aluminium

Les dissipateurs thermiques sont généralement constitués de métaux ; et, l'aluminium est le métal le plus couramment utilisé dans le dissipateur de chaleur. Nous sommes conscients du fait que la conductivité thermique de chaque métal est différente. La conductivité thermique du métal est proportionnelle au transfert de chaleur dans le dissipateur de chaleur. Ainsi, si la conductivité thermique du métal augmente, la capacité de transfert de chaleur du dissipateur thermique augmentera également. La conductivité thermique de l'aluminium est de **235 W/mK** ; c'est le métal le moins cher et le plus léger. Les dissipateurs thermiques en aluminium sont également appelés dissipateurs thermiques extrudés car ils peuvent être fabriqués par extrusion. [31]



Figure III.7 : dissipateur de chaleur aluminium.

III.4.3.4 Dissipateurs de chaleur estampés

Ceux-ci sont faits de métaux qui sont estampés pour former une forme particulière. Ce tampon crée les dissipateurs de chaleur chaque fois que le métal est déplacé dans la machine à emboutir. Ceux-ci sont moins chers que les dissipateurs de

chaleur extrudés. [31]

Ceux-ci sont utilisés pour les applications à faible puissance et sont donc peu performants.

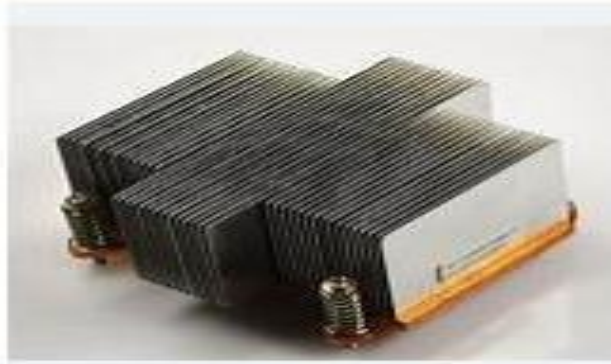


Figure III.8 : dissipateur de chaleur estampé.

III.4.3.5 Usinage des dissipateurs thermiques

Ceux-ci sont fabriqués par procédé d'usinage; fréquemment, la scie à ruban est utilisée pour enlever un bloc de matériau afin de réaliser des ailettes inter avec un espacement précis. Ceux-ci sont chers car beaucoup de métal peut être gaspillé dans le processus de fabrication. [31]



Figure III.9: dissipateur de chaleur thermique.

III.4.3.6 Dissipateurs thermiques à ailettes collées

Ceux-ci sont fréquemment utilisés pour des applications physiquement importantes qui nécessitent des performances sensibles telles que le soudage électrique et les applications de briques **DC-DC**. Ceux-ci sont fabriqués en collant des ailettes individuelles d'un métal à la base d'un dissipateur thermique. Cela peut se faire selon deux méthodes, à savoir l'époxy thermique qui est économique et l'autre par brasage qui est

coûteux. [31]



Figure III.10: dissipateur thermique à ailettes collées.

III.4.3.7 Dissipateurs de chaleur à ailettes pliées

Ces dissipateurs thermiques à ailettes pliées ont une grande surface et possèdent un matériau de dissipateur thermique plié, et par conséquent, ils ont des performances très élevées et une densité de flux thermique très élevée. Dans ces dissipateurs, l'air est dirigé pour s'écouler directement dans les dissipateurs de chaleur à travers une sorte de conduit. Cela rend l'ensemble coûteux car le coût de fabrication et de canalisation est inclus dans le coût global de l'évier. [31]



Figure III.11: dissipateur de chaleur à ailettes pliées.

III.4.3.8 Dissipateurs de chaleur biseautés

Le processus de skiving est utilisé pour la fabrication de ces éviers, qui consiste à fabriquer des blocs de métaux très fins, généralement du cuivre. Par conséquent, ceux-ci sont appelés dissipateurs thermiques biseautés. Ce sont des dissipateurs thermiques de

moyenne à haute performance. [31]

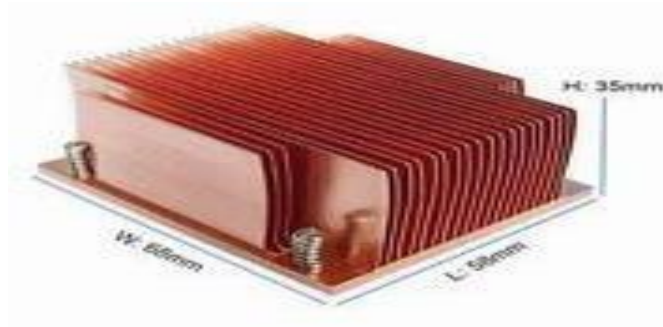


Figure III.12: dissipateur de chaleur biseauté.

III.4.3.9 Dissipateurs de chaleur forgés

Les métaux comme le cuivre et l'aluminium sont utilisés pour former des dissipateurs de chaleur en utilisant des forces de compression. Ce processus est appelé processus de forgeage. Par conséquent, ils sont appelés dissipateurs thermiques forgés. [31]



Figure III.13: dissipateur de chaleur forgé.

III.4.3.10 Dissipateurs thermiques à ailettes simples

Ils sont légers et peuvent être installés dans des espaces restreints. Ils possèdent également une capacité de performance faible à élevée et peuvent être utilisés pour de nombreuses applications. Mais l'inconvénient majeur est qu'ils sont un peu chers. [31]



Figure III.14: dissipateur thermique à ailettes simple.

III.4.3.11 Dissipateurs de chaleur sertis

L'emboutissage est un processus de forgeage à froid, mais peut parfois être effectué même en tant que processus de travail à chaud dans lequel les dimensions d'un article sont modifiées dans une matrice. Ceux-ci sont peu coûteux, moyennement performants et limités dans la gestion du débit d'air. [31]



Figure III.15: dissipateur de chaleur sertis.

III.5 refroidissement électronique

III.5.1 La définition

C'est une opération qui permet de résoudre les problèmes thermiques qui peuvent nuire au bon fonctionnement des circuits électroniques. Le système de refroidissement doit être compatible avec l'environnement dans lequel il doit être utilisé d'une part et d'autre part, il faut imposer aux systèmes de refroidissement certaines limitations. En

général, il existe cinq critères qui doivent être considérés lors de la conception d'un système de refroidissement :

- Sa capacité
- Sa fiabilité
- Sa commodité d'emploi
- Sa compatibilité avec l'équipement Électronique
- Son coût

Les systèmes de refroidissement doivent être capables de remplir leur fonction d'une manière reproductible et prévisible, même confrontés à un changement de l'environnement extérieur ; leurs performances doivent être soutenues pendant une certaine durée de vie, avec un minimum d'entretien .

À la limite, le taux des pannes d'un système de refroidissement doit être inférieur à celui des composants qu'il protège. Le meilleur système de refroidissement est celui qui satisfait de la façon la plus simple les exigences thermiques d'un équipement électronique. [32]

III.5.2 Le rôle de refroidissement

Afin de résoudre les problèmes thermiques qui peuvent nuire au bon fonctionnement des circuits électroniques ; on fait appel au refroidissement efficace. D'une part ; le système de refroidissement doit être compatible avec l'environnement dans lequel il doit être utilisé. D'autre part ; il faut imposer aux systèmes de refroidissement certaines limitations. Les premières limitations concernent la thermique et la mécanique. Ces limitations ne sont pas les seules et, en fait, peuvent ne pas être les plus importantes. En général, il existe cinq critères qui doivent être considérés lors de la conception d'un système de refroidissement [33] :

- sa capacité.
- sa fiabilité.
- sa commodité d'emploi.
- sa compatibilité avec de l'équipement électronique.
- son prix.

Les systèmes de refroidissement doivent être capables de remplir leur fonction d'une

manière reproductible et prévisible, même confrontés à un environnement extérieur changeant; leurs performances doivent être soutenues pendant une certaine durée de vie, avec un minimum d'entretien. A la limite, le taux de pannes d'un système de refroidissement doit être inférieur à celui des composants qu'il protège [33].

La commodité d'emploi du système de refroidissement doit être prise en considération de telle sorte que les composants critiques de l'équipement électronique soient facilement accessibles et déconnectables pour être testés, réparés ou remplacés.

Le système de refroidissement pour l'équipement électronique doit tenir compte des considérations économiques dans l'analyse finale. Le coût du système de refroidissement doit être maintenu dans une proportion raisonnable du coût total de l'équipement électronique. Lors de la conception du système de refroidissement d'un équipement électronique toutes ces limitations doivent être prises en considération et comme dans toute conception le système optimum sera le résultat d'une série de mesures [33].

Ces mesures sont basées sur l'évaluation des avantages d'une méthode de refroidissement par rapport à ses limitations et sur la pondération de ses avantages et de ses désavantages par rapport à une classification par ordre d'importance de ses différentes limitations.

Le meilleur système de refroidissement est celui qui satisfait de la façon la plus simple les exigences thermiques d'un équipement électronique [33].

III.5.3 Les systèmes de refroidissement

Il existe différentes technologies de systèmes de refroidissement qu'il est possible de classer en deux grandes catégories :

- **Les systèmes de refroidissement actifs** : cette technique est basée sur le transfert de chaleur par convection forcée et nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide caloporteur ainsi qu'un circuit externe afin d'évacuer la chaleur du système vers l'extérieur.
- **Les systèmes de refroidissement passifs** : ils ne nécessitent pas d'alimentation externe ce qui diminue le coup énergétique. Un refroidissement passif peut lui-même être classé en deux sections : direct ou indirect suivant que le fluide caloporteur soit ou ne soit pas en contact avec les composants électroniques. La

figure III.16 présente une classification des systèmes de refroidissement passifs suivant les deux modes de transfert de chaleur.

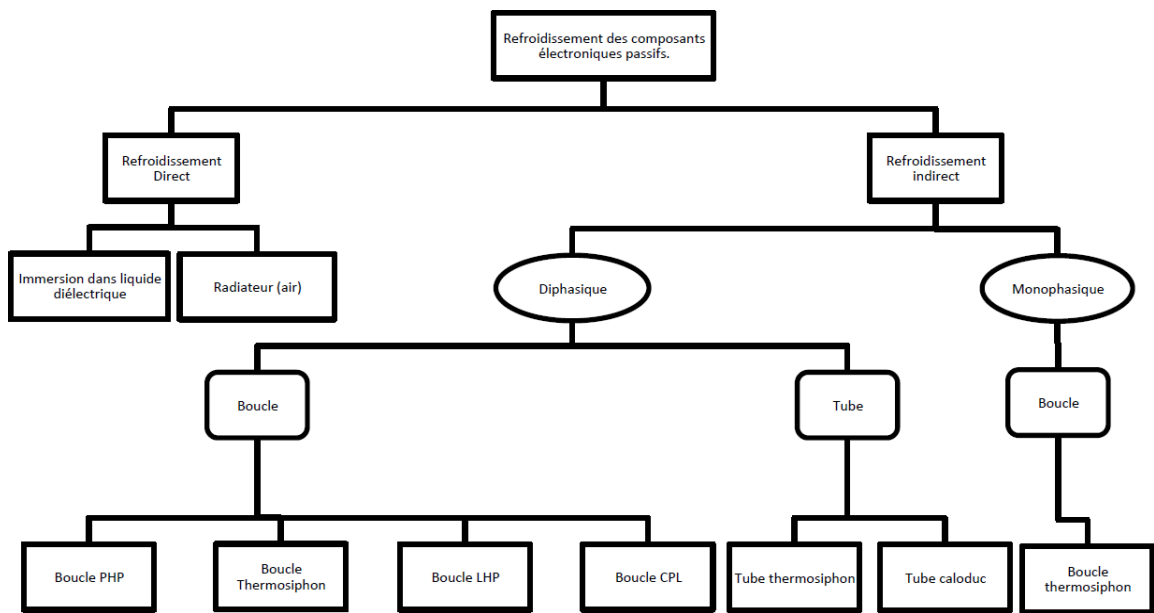


Figure III.16 : Classification des systèmes de refroidissement passif(LUSAC). [34]

Dans le cas du refroidissement direct, le fluide de refroidissement doit être diélectrique (résistivité électrique élevée, bonne résistance au claquage), il doit présenter une faible viscosité, une faible tension superficielle et enfin une bonne compatibilité chimique avec les matériaux présents. Les facteurs intervenant lors de la conception de cette installation sont : la puissance du système, la nature du fluide caloporteur, la température d'entrée, etc.

a) Les systèmes de refroidissement monophasiques

Les échangeurs monophasiques intègrent une structure dans laquelle le passage du fluide de refroidissement est réalisé sans changement d'état. Le fluide se « charge » de la puissance dissipée par l'élément électronique, élevant la température du fluide.

- **Système de refroidissement à l'air**

Les principaux avantages de ce système de refroidissement est sa relative simplicité et le faible coût de mise en œuvre technique.

Convection naturelle dans l'air : L'élément électronique est placé dans l'air

ambiant au repos, la différence de température entre le milieu ambiant et l'élément électronique permet un échange dont le coefficient d'échange h est compris entre **5** et **25 W.m⁻²**.

2. Pour utiliser la convection de puissance pour de plus hauts niveaux de puissance à évacuer, les systèmes de refroidissement à air ont besoin d'ailettes ou de nid

d'abeille, conférant au refroidisseur une surface d'échange plus importante entre l'élément à refroidir et le milieu ambiant.



Figure III.17 : Exemple d'ailette de refroidissement et de nid d'abeille pour augmenter la surface d'échange convectif (ELECTROLUBE). [34]

Convection forcée dans l'air : Le soufflage d'air forcé grâce à des ventilateurs est la méthode la plus utilisée en refroidissement de composants électroniques de par sa simplicité de mise en œuvre, de son coût et de sa fiabilité. Le refroidissement par ventilateur piézoélectrique est une autre technique de refroidissement basée sur le soufflage d'air. Ces dernières années avec l'augmentation de la densité thermique des composants, les radiateurs ont atteint des dimensions impactant l'encombrement. La limite de la densité thermique des composants est probablement atteinte avec ce type de refroidissement, d'où la nécessité du passage à un refroidissement plus efficace en changeant de liquide

caloporteur, notamment.

L'exemple classique est le refroidissement liquide grâce à des radiateurs à eau, par analogie avec le refroidissement à air avec radiateurs à air.

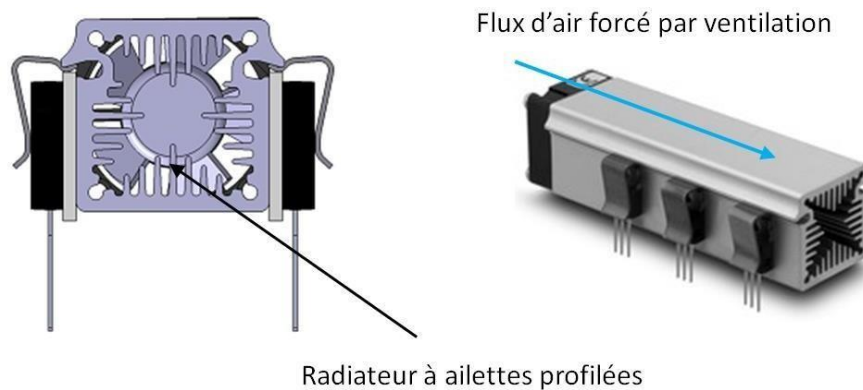


Figure III.18 : Système de refroidissement forcé par air Radiateur (Fisher Elektronik) et ventilateur(SEPA). [34]

- Système de refroidissement liquide

Le refroidissement liquide monophasique indirect est implémenté dans les composants électroniques sous la forme d'une plaque à eau dans laquelle circule un liquide caloporteur ou de canalisation fluide accolées aux parois à refroidir. Un système composé principalement d'une pompe et d'un échangeur permet d'évacuer la chaleur contenue dans le liquide caloporteur vers l'extérieur du serveur. Des variantes du refroidissement liquide par plaque froide existent.

Le choix d'un fluide de refroidissement doit être en relation avec :

Les conditions de stockages du fluide : Le fluide caloporteur le plus couramment utilisé est de l'eau glycolée en raison de sa conductivité thermique élevée, de sa grande capacité calorifique et de sa disponibilité. La figure 19 présente la variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction du fluide caloporteur et du mode de refroidissement.

La conductivité thermique : Ces paramètres physiques sont souvent utilisés à la température moyenne du fluide de refroidissement. Cependant il varie en fonction de la température, du vieillissement et l'encrassement du liquide. Plusieurs études ont mis en évidence que les propriétés de ce fluide caloporteur varient selon la période d'utilisation des composants électroniques.

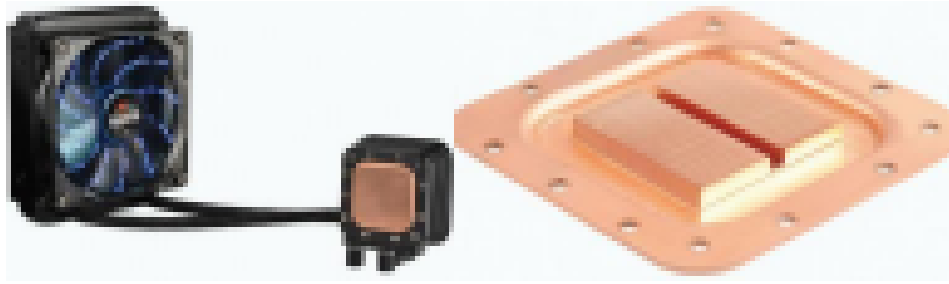


Figure III.19 : Refroidissement liquide à micro-canaux (EnermaxLiqmax 120S). [34]



Figure III.20 : Refroidissement liquide à mini-canaux (CeramCool® LiquidCoolin). [34]

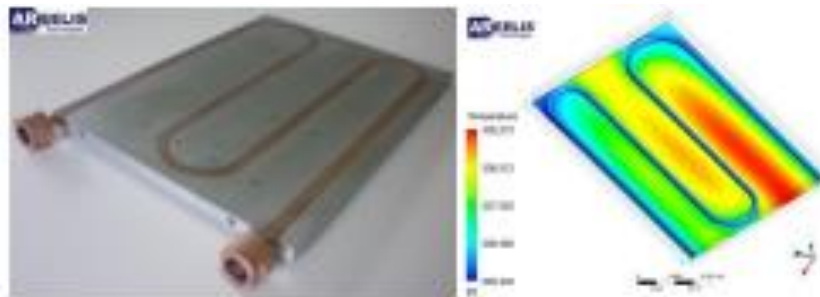


Figure III.21 : Refroidissement liquide à plaque froide (AREELIS Technologies). [34]

- **Spray cooling**

Le refroidissement à l'aide d'un jet de liquide atomisé ou « spray cooling » exploite ces trois modes. Le principe consiste à pulvériser un liquide proche de la paroi que l'on souhaite refroidir. L'évacuation de la chaleur par le film liquide formé à la surface de la paroi. Lorsque, dans des conditions données de pression, on apporte un flux de chaleur suffisant à un liquide, sa température augmente jusqu'à une certaine valeur, la température d'ébullition, puis une partie de plus en plus grande passe à l'état gazeux, la température restant sensiblement constante

La quantité de chaleur nécessaire à cette transformation d'une unité de masse est l'enthalpie de vaporisation. Ce phénomène est réversible et, lors du retour à l'état liquide, cette quantité de chaleur est restituée. La circulation d'un fluide entre deux points, à l'état de vapeur dans un sens et à l'état liquide dans l'autre, permet donc un transfert de chaleur de l'un vers l'autre. La température d'ébullition étant une fonction croissante de la pression, dans les systèmes à volume constant, la pression et la température croissent simultanément au fur et à mesure qu'une quantité plus grande de liquide se transforme en vapeur.



Figure III.22 : Exemples de modules spray cooling (SPRAYCOOLL). [34]

- **Refroidissement par jets**

Dans le cas des super-calculateurs, un jet de fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe sur les éléments semi-conducteurs. En comparaison aux systèmes de refroidissement par spray, le refroidissement par jets est utilisé dans l'aéronautique sur des éléments de plus grandes surfaces. Sur des éléments semi-conducteurs, et fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe.

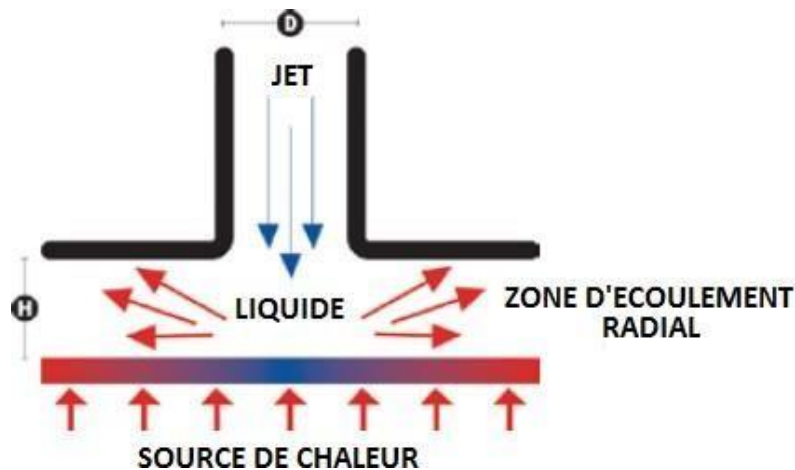


Figure III.23 : Refroidissement par jets. [34]

b) Systèmes de refroidissement diphasique

- **Refroidissement par changement de phase solide-liquide**

La chaleur est absorbée lorsque le matériau change de l'état solide à liquide, et elle est relâchée lorsque celui-ci passe de l'état liquide à l'état solide.

- **Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur**

Ce mode de refroidissement par changement de phase liquide-vapeur est considéré comme l'un des moyens les plus efficaces et les plus adaptables pour refroidir les systèmes énergétiques. En effet la quantité de chaleur dissipée dépend du débit massique du fluide caloporteur et de sa chaleur de vaporisation. L'avantage majeur de ce mode de refroidissement réside dans le fait que le fluide circule sans aucune pompe mécanique.

On peut distinguer quatre classes de refroidissement qui diffèrent de par leur configuration :

- Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique.
- Refroidissement par caloducs.
- Refroidissement par thermosiphon.
- Refroidissement par boucle diphasique à deux lignes.

c) Drain thermique

La conduction thermique est retenue pour des composants mécatronique de faible puissance thermique induite, pour des circuits imprimés ou des boîtiers de systèmes électriques.

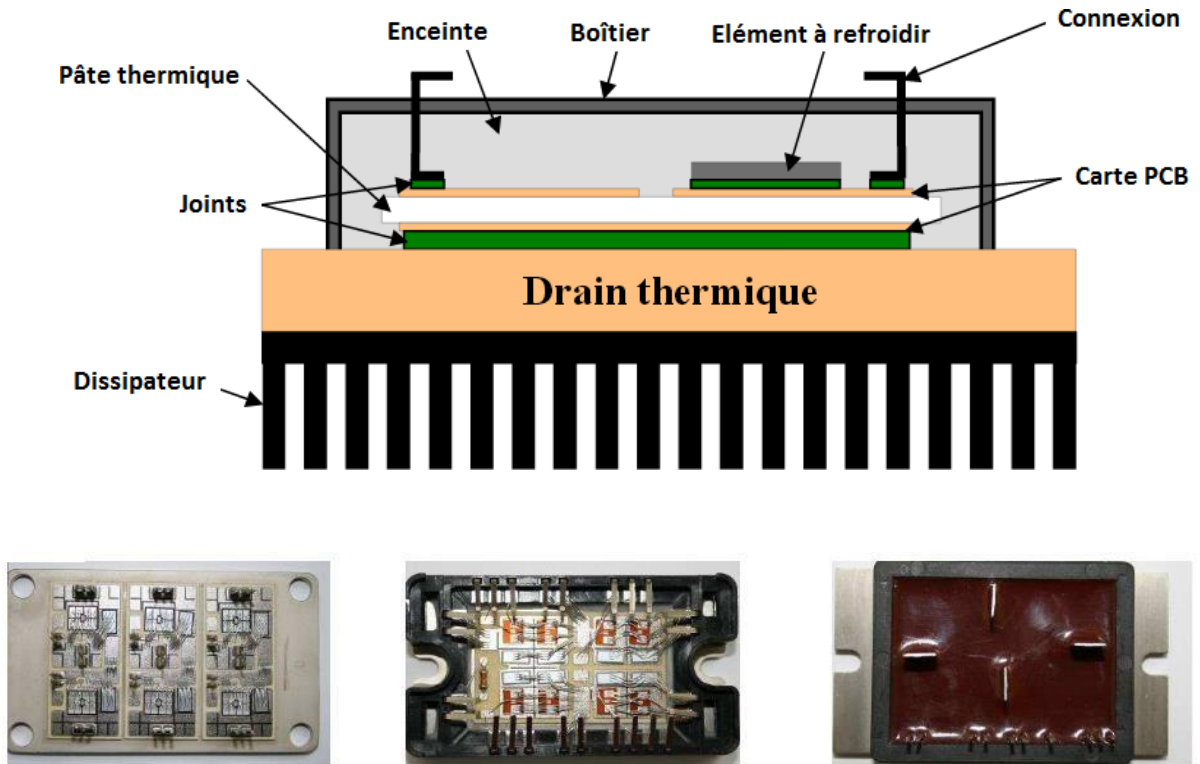


Figure III.24 : Principe et exemples de drains thermiques externes. [34]

d) Refroidissement par effet palties

En chauffant une des jonctions, un courant électrique se met à circuler dans le circuit. Ces effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre le phénomène de conduction thermique et celui de conduction électrique sont connues sous le nom d'effet Seebeck. Si une différence de potentiel électrique est appliquée le circuit, un effet de réfrigération en résulte.

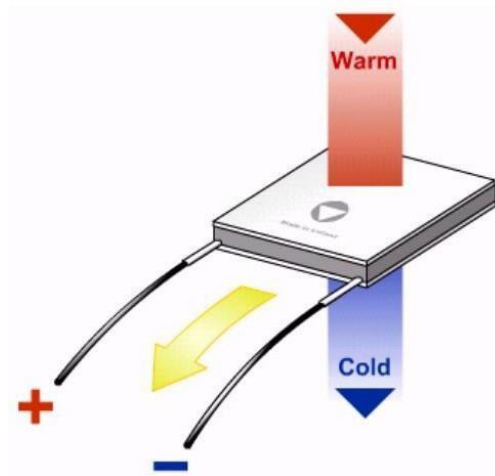


Figure III.25 : Effet Peltier. [34]

III.6 Conclusion

Grace aux progrès technologiques, les composants électroniques deviennent de plus en plus petits et de plus en plus rapides. Les densités de flux de chaleur à évacuer deviennent très importantes. Tout composant semi-conducteur admet une température maximale de fonctionnement, appelée température maximale de jonction, dépendant du type de matériau utilisé et de la technologie de réalisation. Cette température maximale de jonction reste une donnée importante puisque c'est elle qui permet d'estimer le niveau de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement du composant.

Chapitre IV

Modélisation mathématique

IV.1 Introduction

Le transfert de chaleur est un phénomène complexe est formulé mathématiquement par les équations aux dérivées partielles et se passe dans la configuration considérée dans notre présente étude. On commence par la présentation des équations gouvernantes du système, la description de la géométrie, les hypothèses simplificatrices appropriées, les conditions initiales et les conditions aux limites utilisés dans le présent travail.

IV.2 Modèle d'écoulement dans les milieux poreux

Pour bien décrire l'équilibre en quantité de mouvement d'un fluide visqueux newtonien dans un milieu poreux, on utilise un modèle continu d'un milieu poreux basé sur la notion de volume élémentaire représentatif. Darcy-Forchheimer-Brinkman en est le modèle. [35]

L'équation vectorielle décrivant la conservation de la quantité de mouvement dans un milieu poreux est donnée omme suit : [35]

$$\underbrace{\rho_f \left[\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{V}\vec{V}}{\varphi} \right) \right]}_{(a)} = \underbrace{-\frac{1}{\varphi} \vec{\nabla}(\varphi P)}_{(b)} + \underbrace{\rho_f \vec{g}}_{(c)} + \underbrace{\frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 \vec{V}}_{(d)} - \underbrace{\frac{\mu}{K} \vec{V}}_{(e)} - \underbrace{\frac{C_f \rho_f}{K^{1/2}} |\vec{V}| \vec{V}}_{(f)} \quad (IV.1)$$

- (a) Forces inertielles macroscopiques.
- (b) Gradient de pression.
- (c) Forces de volumes.
- (d) Terme visqueux de *Brinkman*.
- (e) Terme de *Darcy*.
- (f) Terme de *Forchheimer* (Forces inertielles microscopiques).

IV.3 Transfert thermique dans un milieu poreux

Nous nous concentrons sur l'équation qui décrit la première loi de la thermodynamique dans un matériau poreux isotrope avec un équilibre thermique local, où les effets radiatifs, la dissipation visqueuse et le travail d'échange de pression sont négligeables : $T_S = T_f = T$.

Nous supposons en outre que la conduction dans les phases solide et fluide se produit en parallèle, et que la conductivité thermique du milieu est la moyenne arithmétique des conductivités des phases solide et fluide. Le milieu poreux dans notre cas est isotrope, donc la conductivité est un scalaire. [35]

- L'équation d'énergie suivante s'applique à l'ensemble du milieu :

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (K_m \vec{\nabla} T) \quad (\text{IV.2})$$

$$(\rho c)_m = (1 - \varphi)(\rho c)_s + \varphi(\rho c_p)_f \quad (\text{IV.3})$$

$$k_m = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_f \quad (\text{IV.4})$$

IV.4 Transfert de matière dans un milieu poreux

Le terme "transfert de matière" fait référence au transport d'une substance qui est incluse en tant que composant (constituant, espèce, etc.) dans un mélange fluide. En général, le transfert de matière est similaire à la transmission de chaleur. Nous appliquons le principe de conservation de la matière à

Chaque composant du mélange, et comme la diffusivité est un scalaire. nous obtenons : [35]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} C) = D \Delta C \quad (\text{IV.5})$$

IV.5 Description du problème

Le problème que nous allons étudier comprend un canal d'air qui a un dissipateur de chaleur à l'intérieur pour refroidir un composant électronique. Le composant électronique est considéré comme une source de chaleur et les parois du canal sont adiabatiques. L'air entre dans le canal par le côté gauche en régime laminaire et sort par le côté droit. Le dissipateur thermique se compose d'une base en aluminium solide et des ailettes elliptiques en mousse d'aluminium (figure IV.1). On a appliqué les conditions de convection naturelle ($u = 0$) et de convection forcée ($u = u_0$). Dans cette étude, le but est de comprendre le comportement

thermodynamique du système et déterminer la distribution de la température, la vitesse et la pression au sein du canal.

IV.6 La géométrie du problème

La géométrie du problème simulé est schématisée par la figure (IV.1).

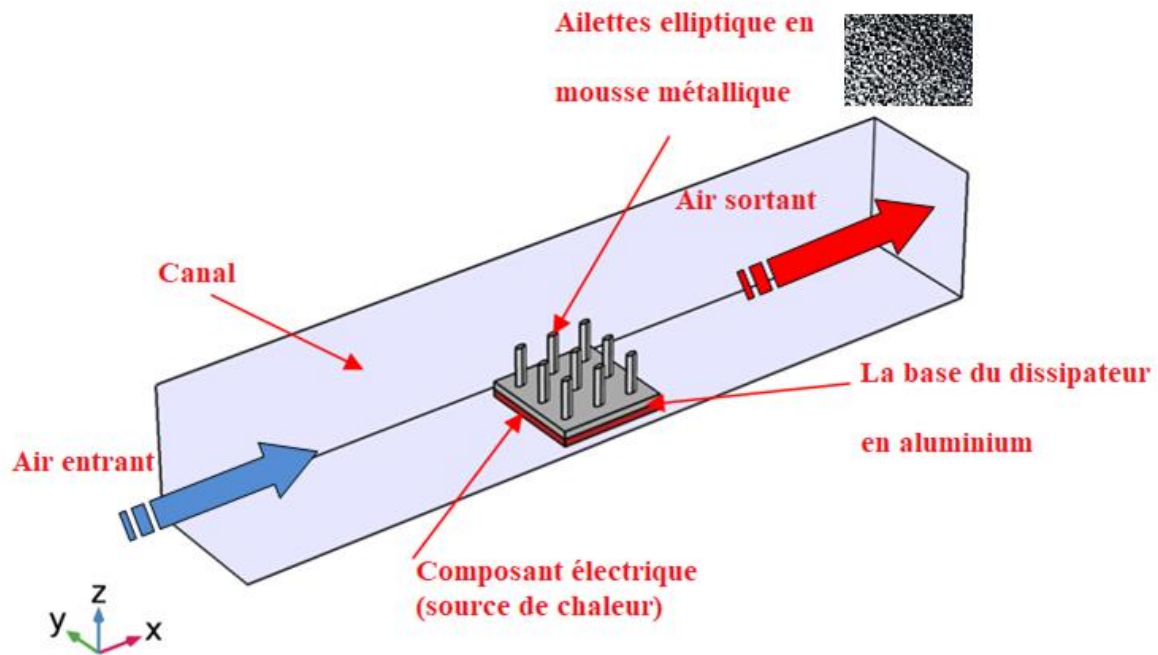


Figure (IV.1) : Géométrie du problème considéré.

Les dimensions de système simulé sont données comme suit :

Longueur de canal = 300 mm

Largueur de canal = 50 cm

Hauteur de canal = 50 cm

Longueur du composant électrique = 40 mm

Largueur du composant électrique = 40 cm

Epaisseur du composant électrique = 3 mm

Epaisseur de la base en mousse d'aluminium = 3 mm

Rayon de grand axe de l'ailette elliptique = 2 mm

Rayon de petit axe de l'ailette elliptique = 1 mm

Hauteur de l'ailette elliptique en mousse d'aluminium = 15 mm

IV.7 Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses suivantes seront utilisées pour une version simplifiée du modèle mathématique : [35]

- le milieu poreux est homogène et isotrope.
- Le fluide est newtonien, visqueux et incompressible lors de son écoulement.
- Le régime d'écoulement est laminaire.
- Il n'y a pas de dispersion thermique.
- Dans l'équation de l'énergie, la dissipation visqueuse est négligeable.
- Les interactions de transfert de chaleur et de masse, connues sous le nom d'effets Soret et Dufour, sont négligeables.
- Outre la masse volumique, les propriétés thermo-physiques du fluide sont constantes et se mesurent à la température et à la concentration de référence.
- L'approximation de Boussinesq est valide, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement ($\rho = \rho_0$), sauf au niveau du terme de gravité.

IV.8 Formulation mathématique

Toutes hypothèses confondues, le système d'équations locales différentielles aux dérivées partielles de conservation continuité, de mouvement fluide qui décrit cette situation dans la zone poreuse est : [36]

- L'équation de continuité:

$$\nabla(\vec{v}) = 0 \quad (\text{IV.6})$$

- Les équations de conservation de la quantité de mouvement

$$\left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{v} - \frac{\mu}{K} \vec{v} - \frac{\varepsilon c_F}{K^2} |\vec{v}| \vec{v} \quad (\text{IV.7})$$

- L'équation de conservation de l'énergie de la phase fluide

$$\varepsilon (\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot \left((k_f + k_d) \nabla T_f \right) + h(T_s - T_f) \quad (\text{IV.8})$$

- L'équation de conservation de l'énergie de la phase solide

$$(1 - \varepsilon) (\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + h(T_f - T_s) \quad (\text{IV.9})$$

Ce problème dans la zone fluide (air) est décrit par un système d'équations aux dérivées partielles différentielles locales de conservation de la continuité pour le mouvement fluide :

[36]

- L'équation de continuité :

$$\nabla(\vec{v}) = 0 \quad (\text{IV.10})$$

- Les équations de conservation de la quantité de mouvement :

$$\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \frac{\mu}{\rho_f} \nabla^2 \vec{v} \quad (\text{IV.11})$$

- L'équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_f = \alpha_f \nabla^2 T_f \quad (\text{IV.12})$$

IV.9 Les conditions initiales aux limites

Les équations différentielles de la modélisation sont résolues avec les conditions initiales et aux limites suivantes :

- Les conditions initiales :

$$t = 0, u = v = w = 0, T = T_0, P = P_0$$

- En amont du canal : (vitesse imposée à $t = 300s$)

$$x = 0, y = 0, z = 0 \text{ et } z = H$$
$$u = u_0 = 1,6 \dots 4,6 \text{ m/s}, v = w = 0, T = T_0, P = P_0$$

- En aval du canal : (pression imposée)

$$x = L, y = 0, z = 0 \text{ et } z = H$$
$$P = P_0$$

- Aux bords du canal : (adhérence à la paroi et isolation thermique)

$$u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

- A la base du dissipateur : (flux thermique imposé)

$$q_{\text{source}} = 5,20, 30 \text{ et } 40 \text{ W}$$

Chapitre V

Résultats et discussion

V.1 Introduction

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes. Différentes modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures...

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numérique en trois dimensions 3D de l'écoulement de l'air au sein d'un canal comprenant un dissipateur thermique en ailettes elliptiques en mousse d'aluminium avec un composant électronique en dessous. Ce composant électronique est considéré comme une source de chaleur qui va chauffer le dissipateur thermique.

V.2 Géométrie et conditions aux limites du système étudié

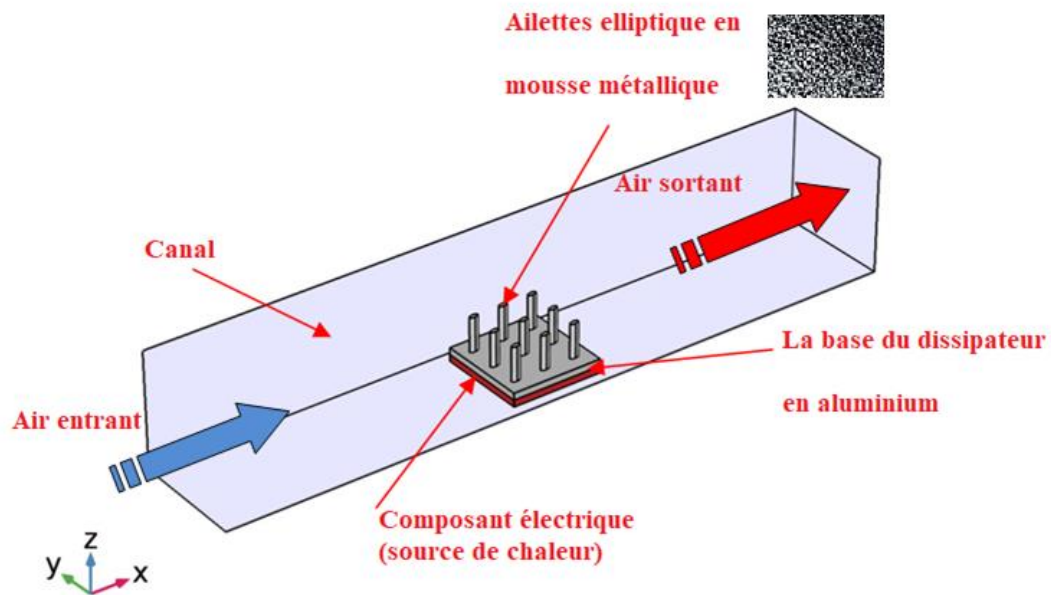


Figure (V.1) : Géométrie 3D et conditions aux limites du système étudié.

V.3 Maillage du système étudié

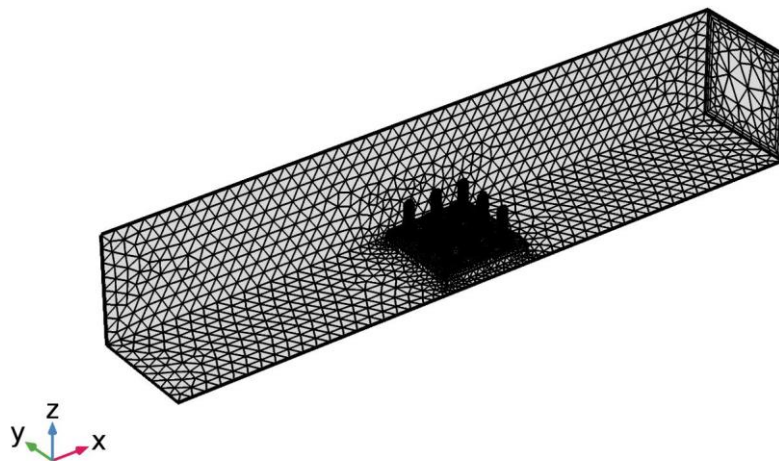


Figure (V.2) : Maillage 3D du système étudié.

V.4 Présentation du COMSO

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique par éléments finis conçu par l'entreprise du même nom. Il permet le couplage de plusieurs physiques entre elles (fluide, thermique, ...etc) et permet une grande personnalisation des modèles que l'on simule. De plus, il nous permet de modéliser des textures à des tailles microscopiques, ce qui est très intéressant pour ce projet. Il est cependant impératif de connaître avec précision les paramètres de notre projet, ainsi que les équations mathématiques qui le gouvernent et de les comprendre rigoureusement. En effet, COMSOL Multiphysics a besoin d'une description assez précise de la géométrie et des paramètres de simulation afin de donner des résultats proches de la réalité. Il est également nécessaire, comme avec tous logiciels de simulation numérique, de vérifier les résultats obtenus à l'issue des simulations obtenues par COMSOL multiphasiques, à l'aide de cas test et d'expérimentations. [35]

V.5 Avantage de conception avec COMSOL multiphasique

Le principal but de la création de COMSOL multiphasiques est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinies pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multiphasiques. Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles. Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [36]

V.6 Résultats de la simulation numérique

V.6.1 Distribution de la température

La figure (IV.3) représente la distribution de la température en fonction du temps au sein d'un canal horizontale comprenant un dissipateur thermique en ailettes elliptiques en mousse d'aluminium avec un composant électronique en dessous. Le composant électronique génère un flux de chaleur $q = 5 \text{ W}$. La première période, l'air est entré avec une

vitesse $U_0 = 0 \text{ m/s}$ à $t=0-300 \text{ sec}$ (convection naturelle). Puis la deuxième période l'air est entrée avec une vitesse $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$ à $t=300-600 \text{ sec}$ (convection forcée). Dans la première période, nous remarquons que la température du système a augmenté et atteint une valeur maximal, qui est 370 K. Et après 300 sec seconde (la deuxième période), lorsque l'air entre à une vitesse $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$, on remarque que la température du système est diminué et atteint une valeur minimale, qui est 310 K.

Le flux dissipé par le composant électronique est transféré à la base du dissipateur thermique par transfert de chaleur conduction, puis vers les ailettes elliptiques. Donc le dissipateur va absorber une partie de flux de chaleur. cette partie de flux va dissiper par transfert de chaleur convection vers l'air.

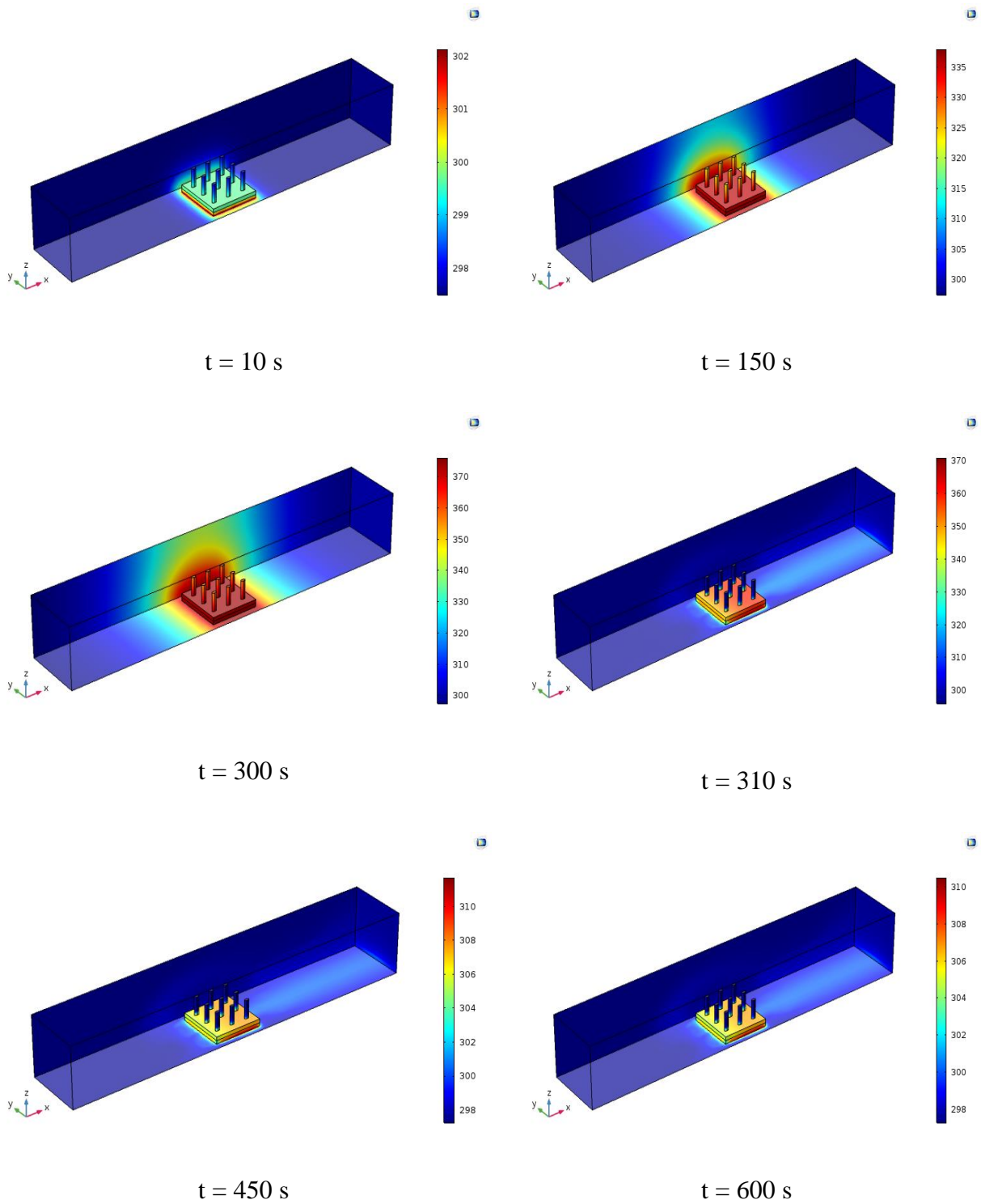


Figure (V.3) : Distribution de la température à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q = 5$ w et $U_0 = 3.6$ m/s.

V.6.2 Distribution de la vitesse

La figure (IV.4) représente la distribution de la vitesse en fonction du temps au sein d'un canal horizontal comprenant un dissipateur thermique en ailettes elliptiques en mousse d'aluminium avec un composant électronique en dessous. Dans la première période, on remarque pas une distribution de la vitesse d'air car cette période est une convection naturelle (période sans écoulement d'air $U_0=0$ m/s). Dans la deuxième période (convection forcée) on remarque que la distribution de la vitesse d'écoulement d'air au sein du canal atteint une valeur maximal au centre du canal et en dessus du dissipateur, et nulle au voisinage des parois du canal. En ce qui concerne aux ailettes elliptique en mousse d'aluminium, ils n'empêchent pas l'écoulement d'air.

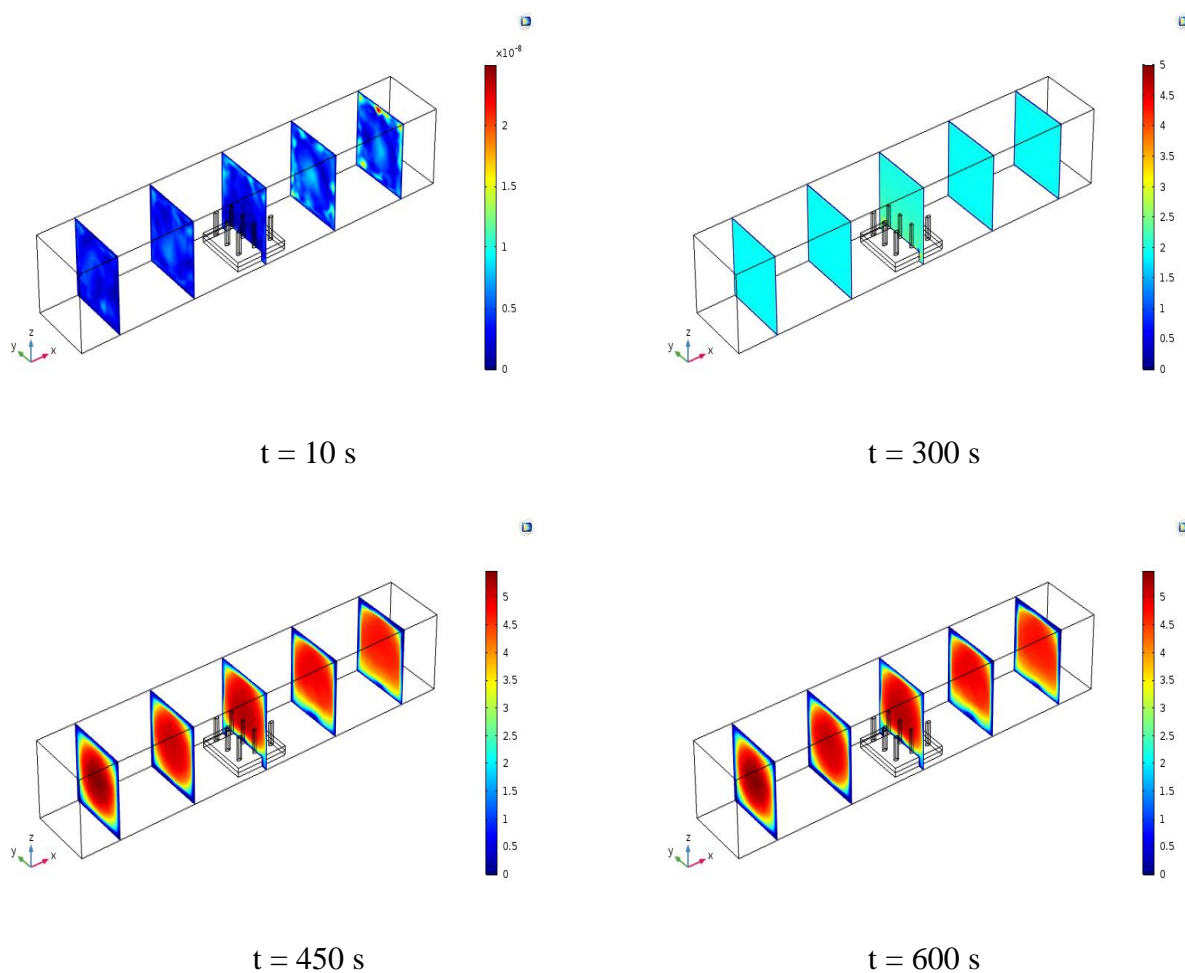


Figure (V.4) : Distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q = 5$ w et $U_0 = 3.6$ m/s.

V.6.3 Distribution de la pression

La figure (IV.5) montre la distribution de la pression lors de l'écoulement de l'air au sein du canal horizontale en fonction de temps sous les mêmes conditions citées ci-dessus. L'évolution de la pression le long du canal est liée à la l'absence ou la présence d'écoulement d'air. Dans la première période, on remarque l'uniformité de distribution de la pression avant et après le dissipateur thermique. Mais dans la deuxième période la distribution de la pression est variée de l'amant vers l'aval du canal. Au fil du temps, on remarque que la pression est élevée dans la zone frontale du composant électronique et de la base du dissipateur thermique.

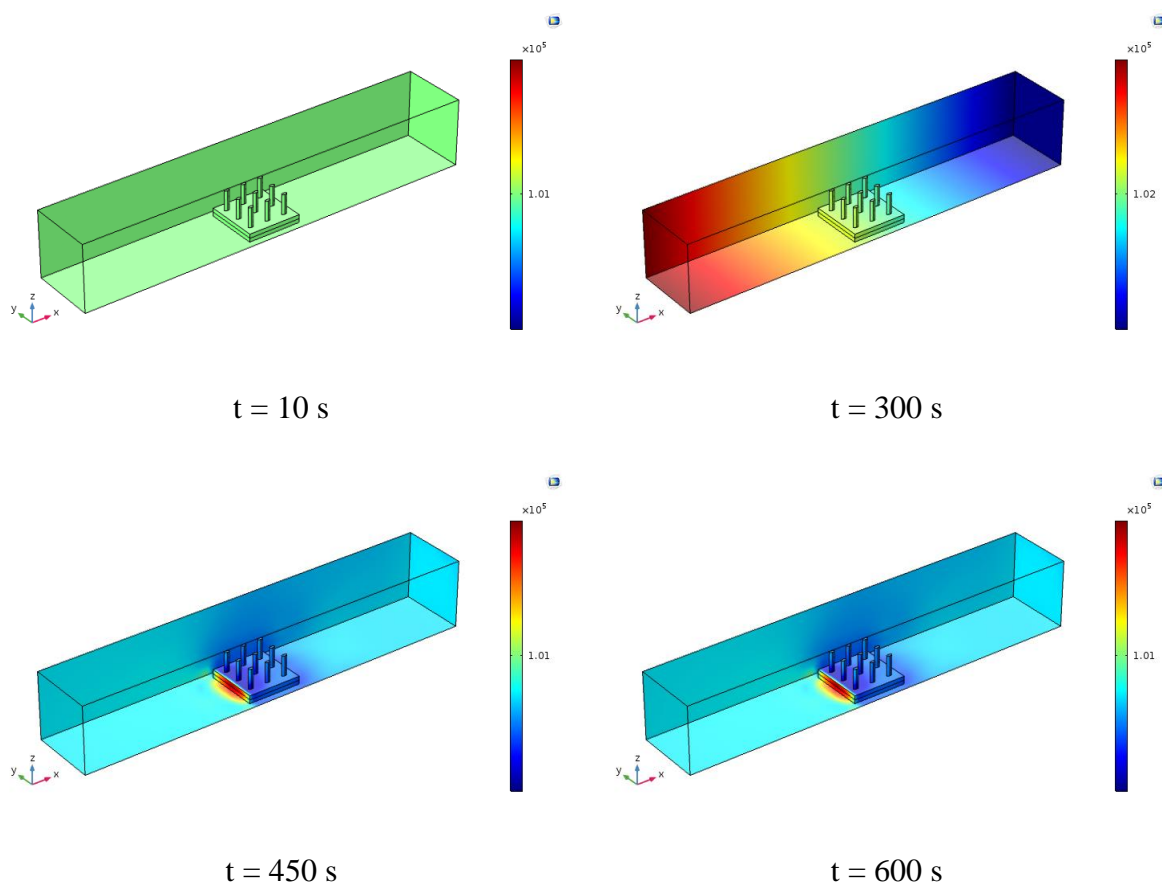


Figure (V.5) : Distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents temps sous conditions de $q = 5$ w et $U_0 = 3.6$ m/s.

V.7 Etude paramétrique

V.7.1 Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la température

La figure (V.6) présente la distribution de la température au sein du canal pour différents nombre d'ailettes elliptiques en mousse d'aluminium. Nous avons pris 09 ailettes, 16 ailettes et 25 ailettes sous les mêmes conditions citées ci-dessus. On remarque de cette figure, la valeur de la température du système augmente progressivement par l'augmentation de nombre des ailettes elliptiques du dissipateur thermique. La valeur de température minimale obtenue par le dissipateur thermique à 9 ailettes et égale 310 K. l'augmentation de nombre des ailettes va empêcher l'écoulement de l'air et ensuite diminuer l'échange de chaleur par convection entre les ailettes et l'air.

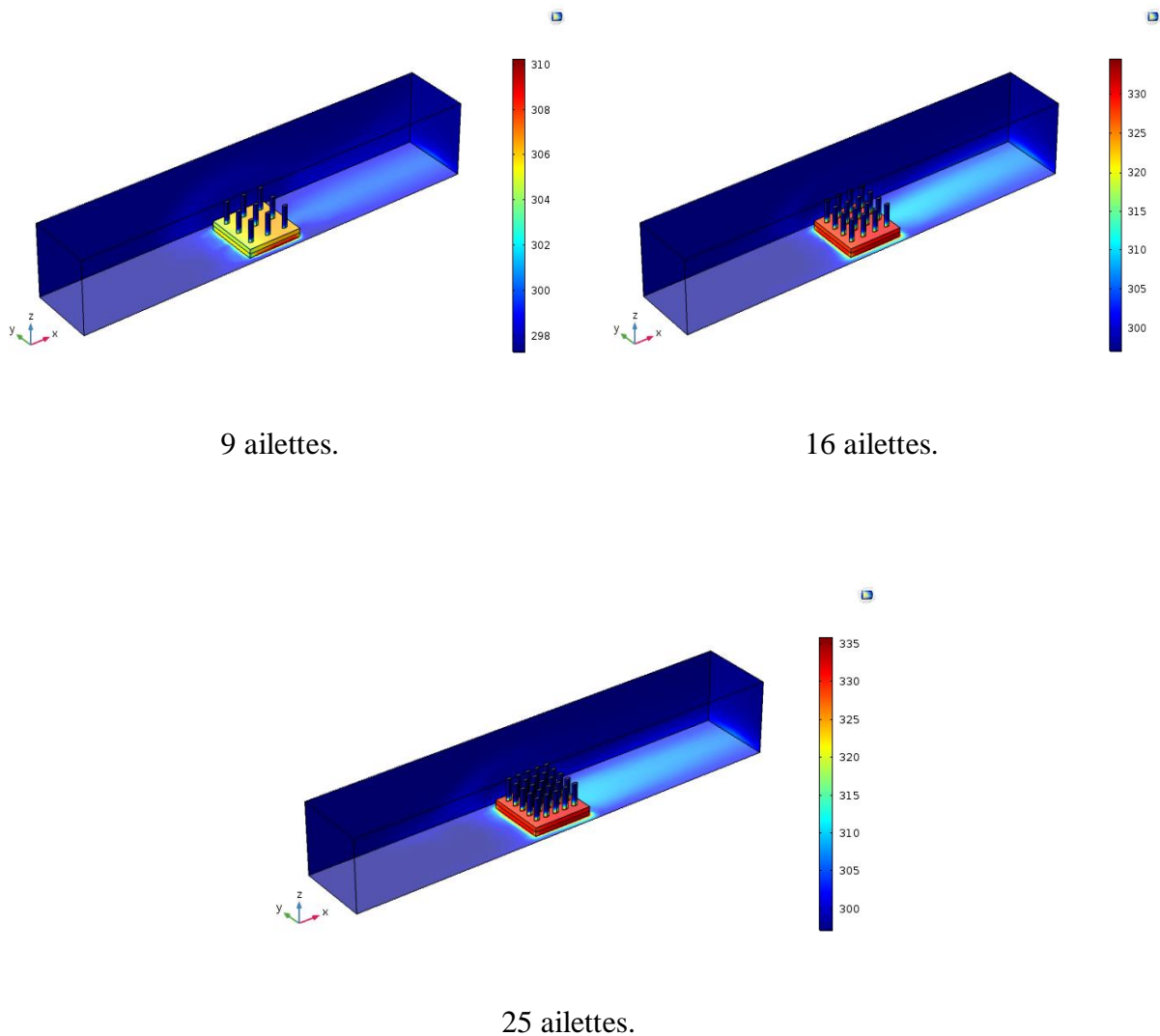


Figure (V.6) : Distribution de la température pour différents nombre d'ailettes elliptiques à travers du dissipateur thermique sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

V.7.2 Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la vitesse

La figure (V.7) illustre la distribution de la vitesse au sein du canal pour différentes nombre d'ailettes elliptiques en mousse d'aluminium. Nous avons pris 09 ailettes, 16 ailettes et 25 ailettes sous les mêmes conditions citées ci-dessus. On remarque de cette figure, la valeur de la vitesse de l'écoulement de l'air diminue avec l'augmentation de nombre des ailettes elliptiques du dissipateur thermique. La valeur de vitesse maximale obtenue par le dissipateur thermique à 9 ailettes.

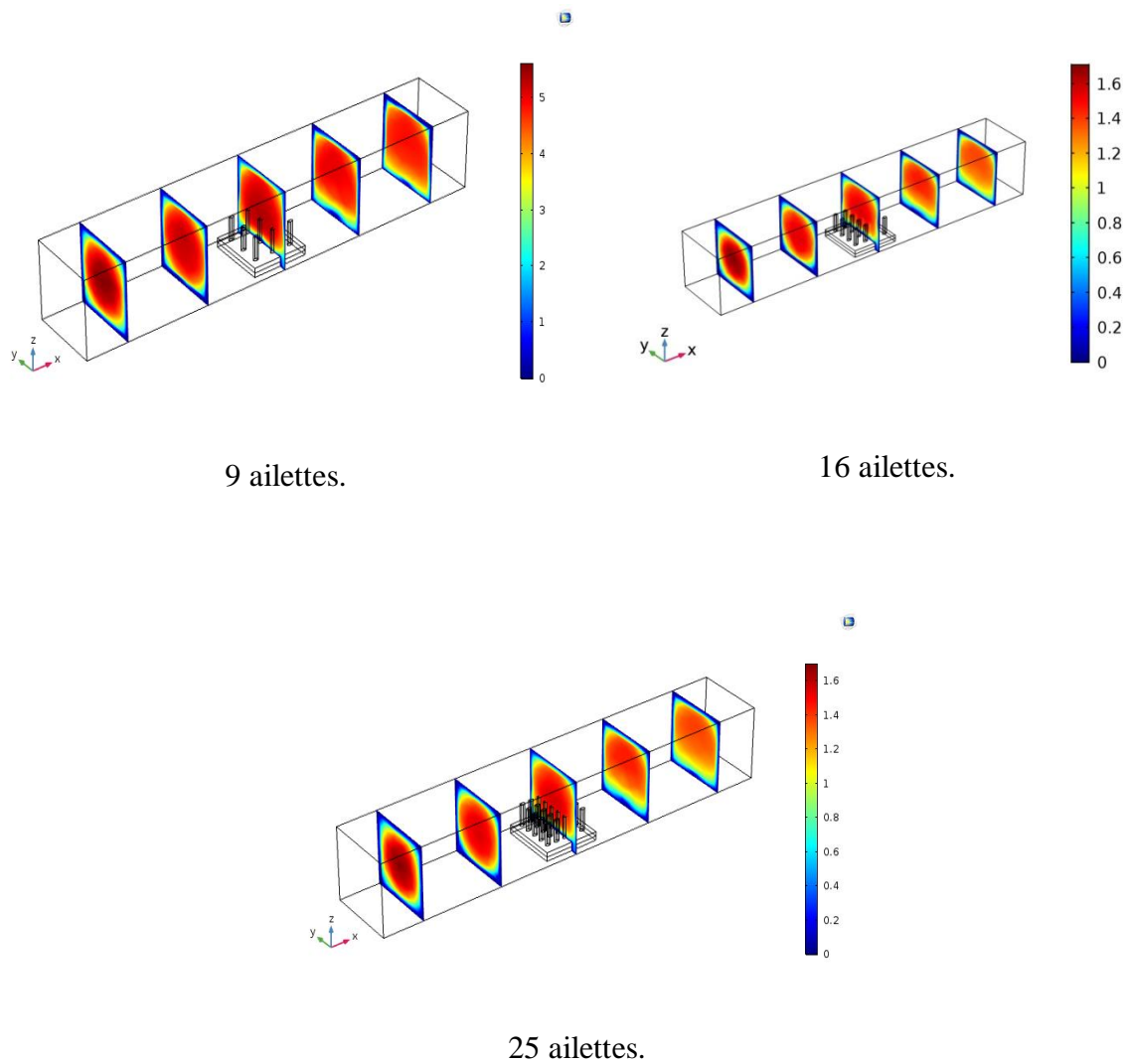


Figure (V.7) : Distribution de la vitesse pour différents nombre d'ailettes elliptiques à travers du dissipateur thermique sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

V.7.3 Effet du nombre des ailettes du dissipateur sur la distribution de la pression

La figure (V.8) présente la distribution de la pression d'un écoulement laminaire de l'air au sein d'un canal horizontal pour différents nombre d'ailettes elliptiques en mousse d'aluminium. Nous avons pris 09 ailettes, 16 ailettes et 25 ailettes sous les mêmes conditions citées ci-dessus. On remarque de cette figure, la distribution de la pression diminue avec l'augmentation de nombre des ailettes elliptiques du dissipateur thermique.

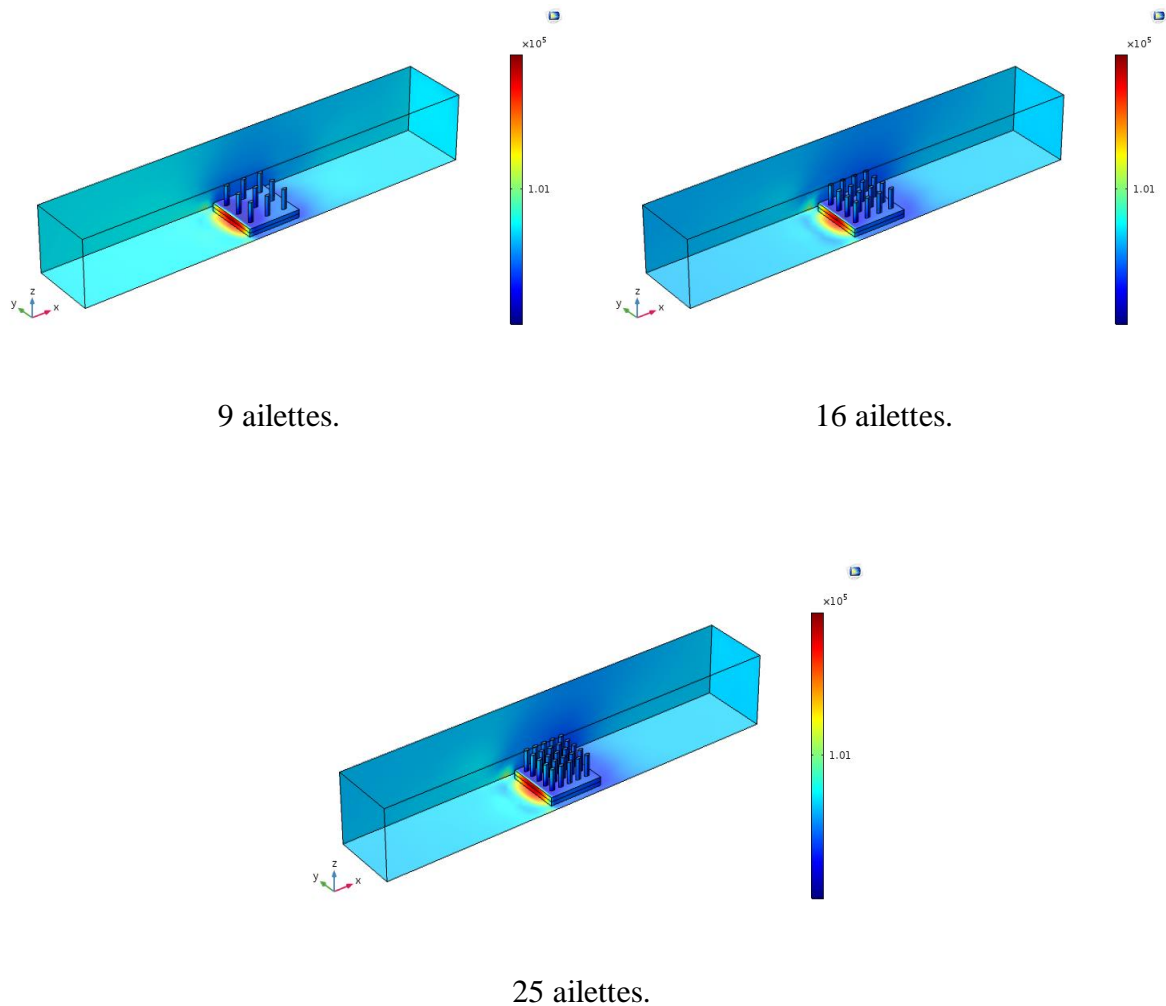


Figure (V.8) : Distribution de la pression pour différents nombre d'ailettes elliptiques à travers du dissipateur thermique sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

V.7.4 Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la température

La figure (V.9) montre la distribution de la température au sein du canal pour différentes vitesses d'écoulement de l'air $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6$ et 4.6 m/s , avec un flux constant dissipé par la source de chaleur $q = 5 \text{ w}$. On remarque de cette figure, la distribution de la température diminue progressivement par l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air telle que, les températures maximales obtenues par les quatre vitesses d'écoulement ($1.6, 2.6, 3.6$ et 4.6 m/s), sont respectivement égaux $320 \text{ K}, 312 \text{ K}, 310 \text{ K}$ et 308 K .

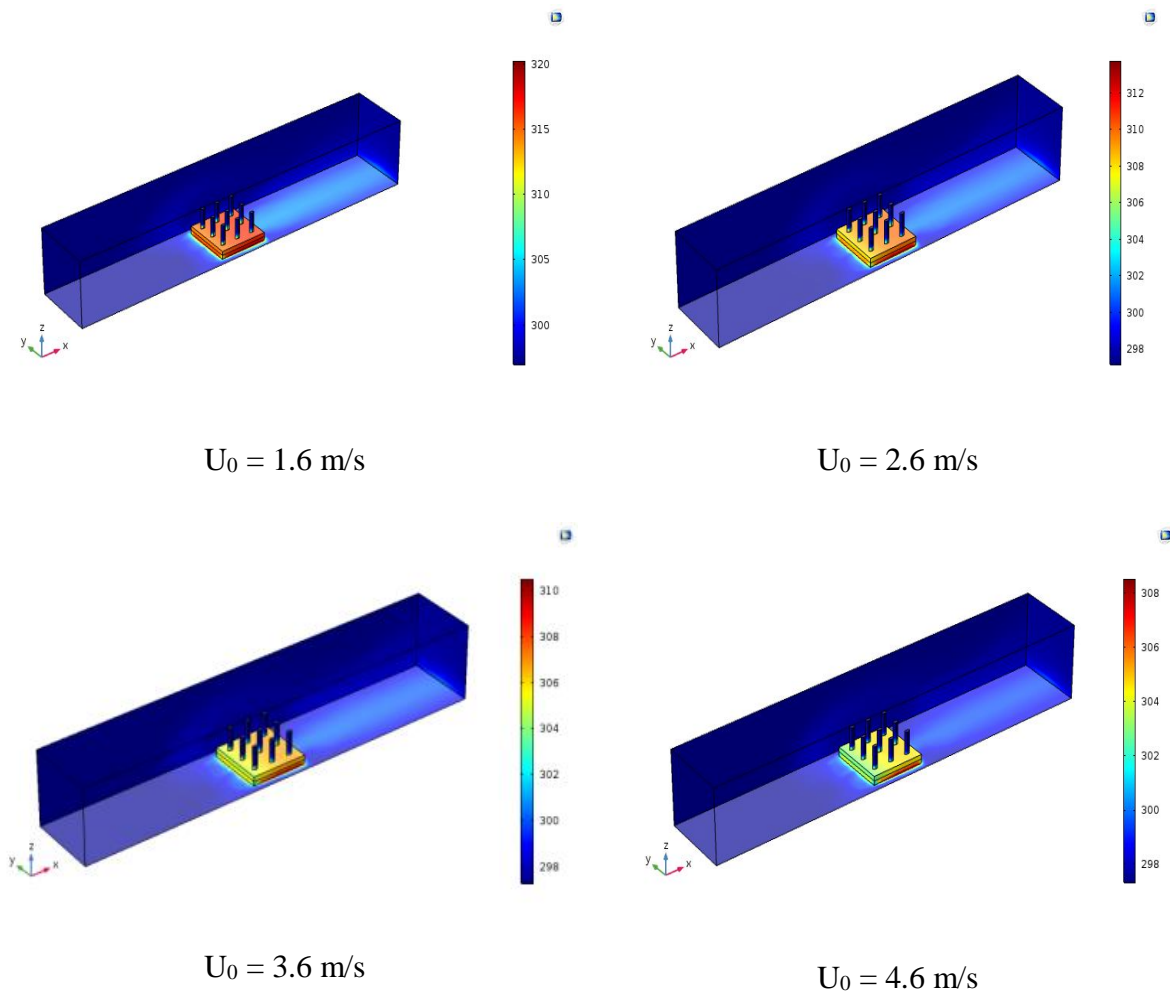


Figure (V.9) : distribution de la température à travers le dissipateur thermique pour différentes valeurs de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$.

V.7.5 Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la pression

La figure (V.10) présente la distribution de la pression au sein du canal pour différentes vitesses d'écoulement de l'air $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6$ et 4.6 m/s , avec un flux constant dissipé par la source de chaleur $q = 5 \text{ w}$. On remarque de cette figure, l'effet de l'augmentation de la vitesse d'entrée de l'air au canal sur la pression est très peu remarquable aux différentes zones du canal. Les zones de la pression élevée restent les mêmes.

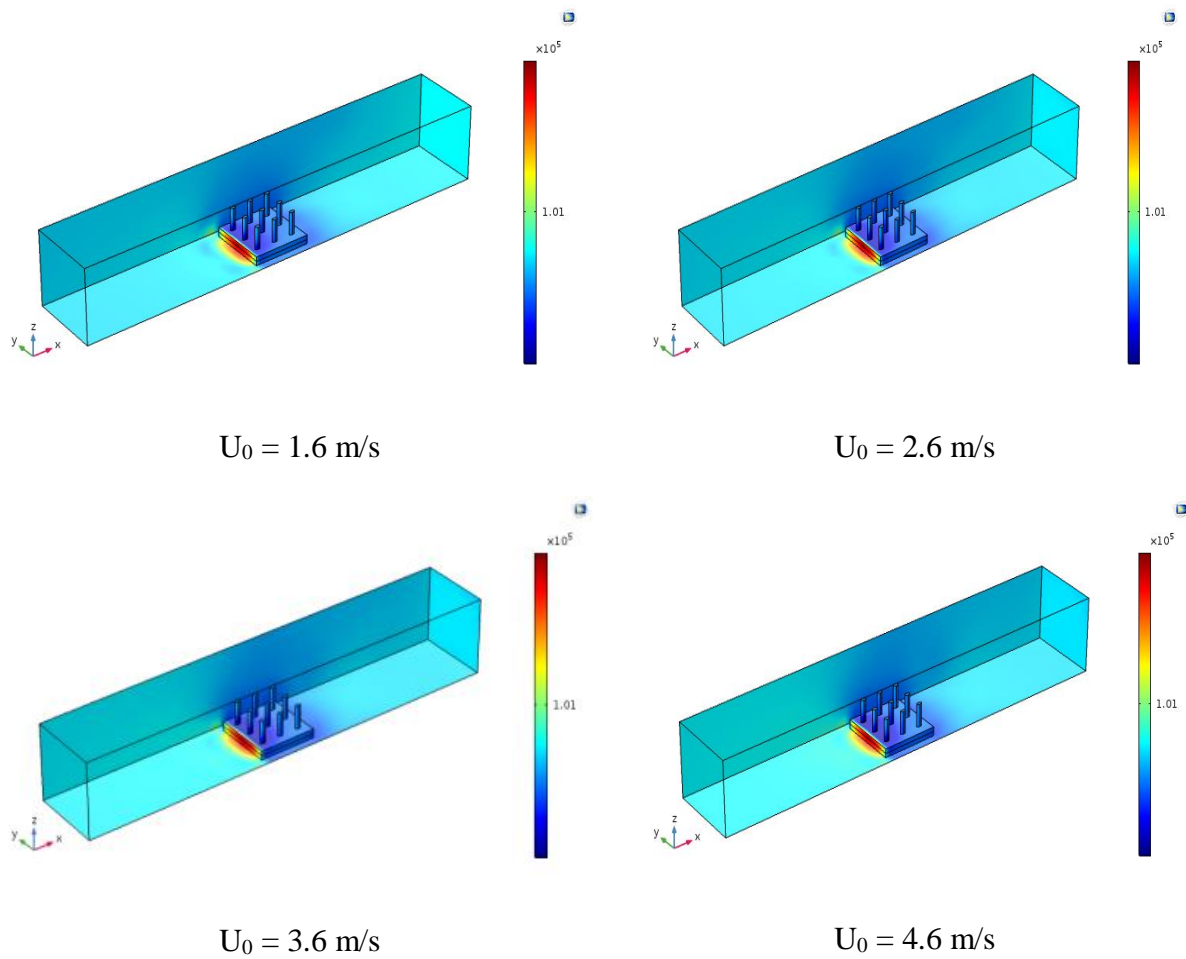


Figure (V.10) : distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différents valeurs de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q = 5 \text{ w}$ et $U_0 = 3.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$.

V.7.6 Effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur la distribution de la vitesse

La figure (V.11) illustre la distribution de la vitesse au sein du canal pour différentes vitesses d'écoulement de l'air $U_0 = 1.6, 2.6, 3.6$ et 4.6 m/s , avec un flux constant dissipé par la source de chaleur $q = 5 \text{ w}$. On remarque de cette figure, la distribution de la vitesse augmente progressivement par l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air.

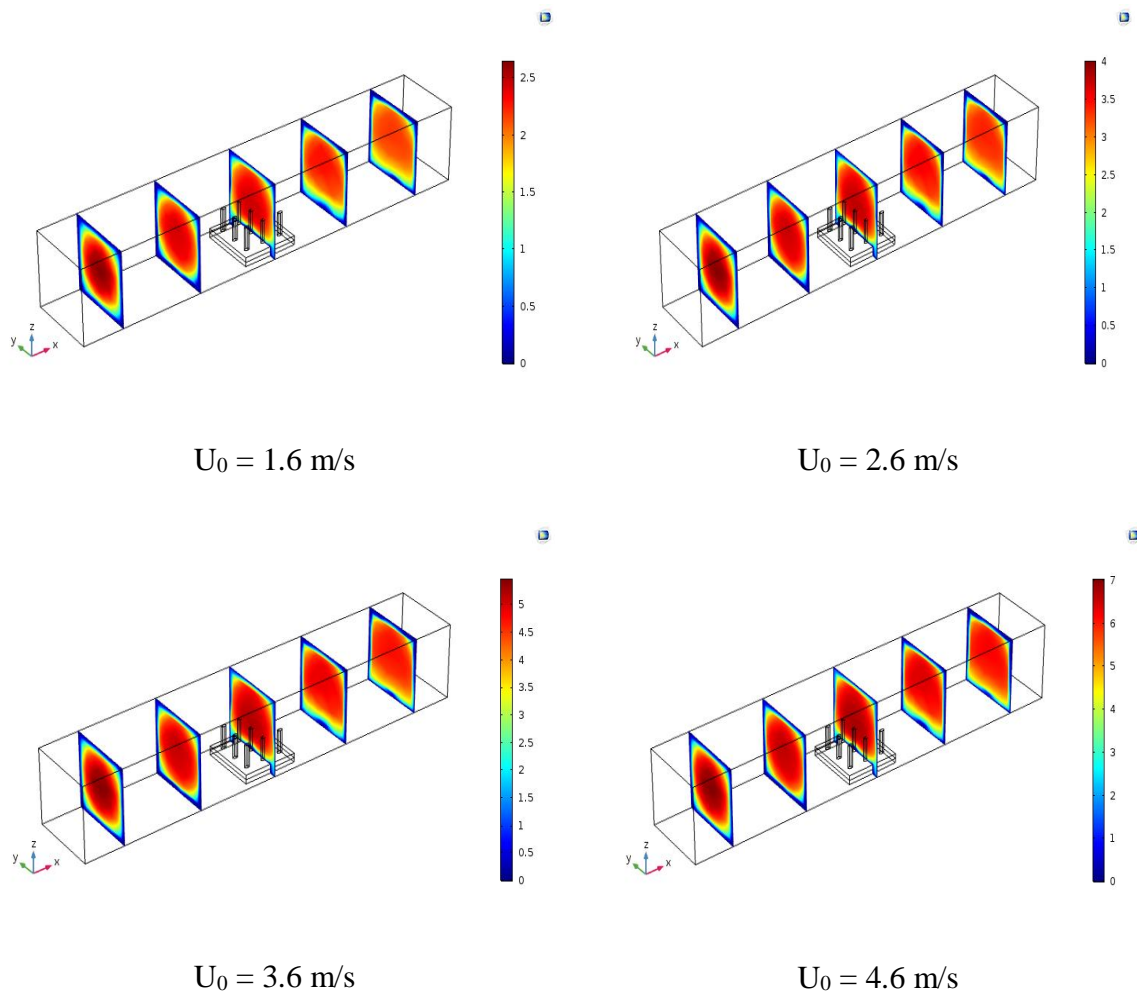


Figure (V.11) : distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différentes valeurs de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sous les conditions $q = 5 \text{ W}$ et $U_0 = 3.6, 2.6, 3.6, 4.6 \text{ m/s}$.

V.7.7 Effet du flux dissipé sur la distribution de la température

La figure (IV.12) montre l'effet de l'augmentation du flux de chaleur dissipé par la source de chaleur $q = 5, 10, 20$ et 40 W sur la distribution de la température au sein du canal pour une vitesse à l'entrée du canal $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$. On observe de cette figure, la distribution de la température augmente progressivement par l'augmentation de la valeur de flux de chaleur, les températures maximales obtenues par les quatre valeurs de source de chaleur ($q = 5, 10, 20$ et 40 W), sont respectivement égales à $310 \text{ K}, 345 \text{ K}, 370 \text{ K}$ et 400 K .

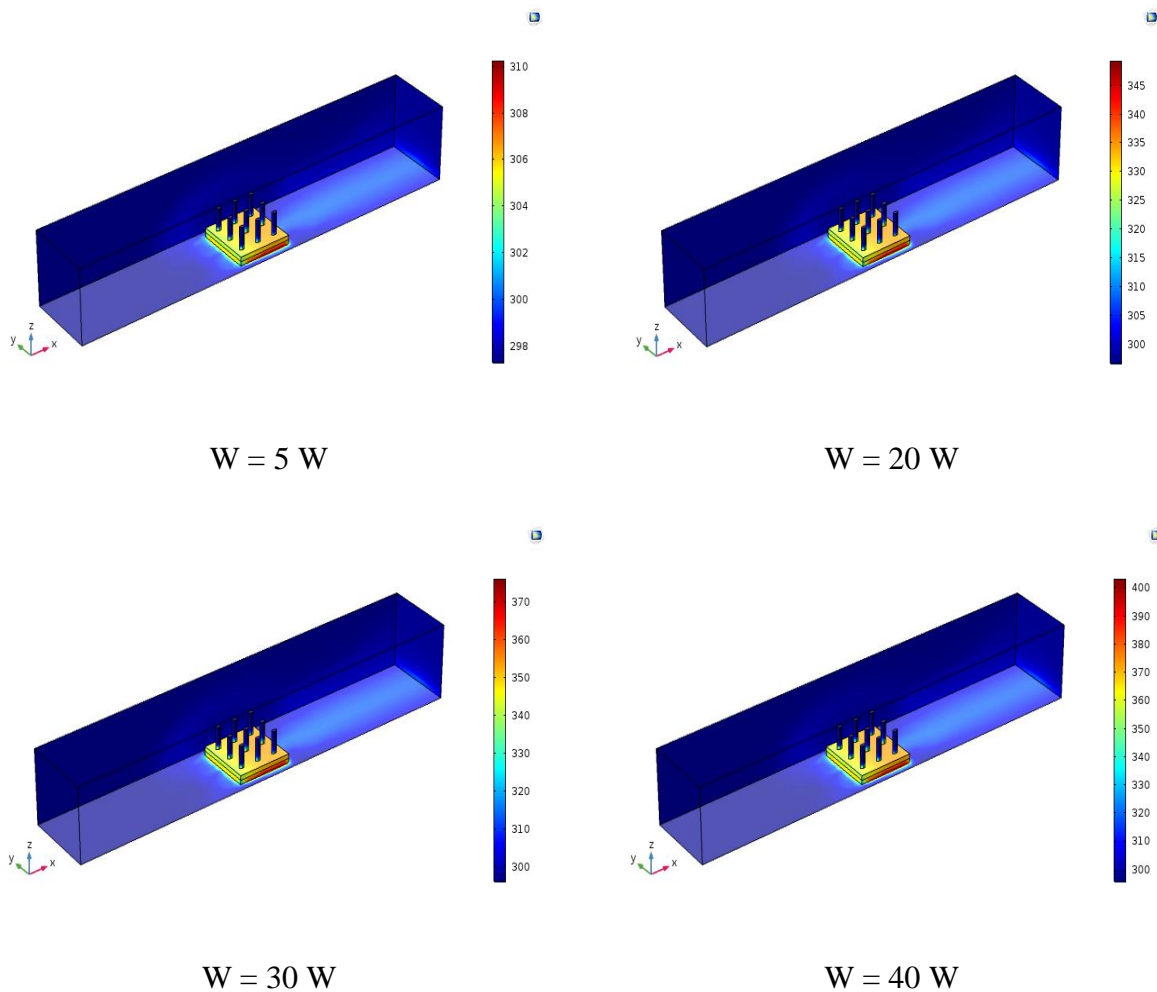


Figure (V.12) : distribution de la température à travers le dissipateur thermique pour différentes valeurs de flux de chaleur $q = 5, 20, 30$ et 40 W , et vitesse de l'air $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

V.7.8 Effet du flux dissipé sur la distribution de la pression

La figure (IV.13) présente l'effet de l'augmentation du flux de chaleur dissipé par la source de chaleur $q = 5, 10, 20$ et 40 W sur la distribution de la pression au sein du canal pour une vitesse à l'entrée du canal $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$. On observe de cette figure, l'effet de l'augmentation du flux de chaleur dissipé par la source de chaleur sur la distribution de la pression est très peu remarquable aux différentes zones du canal. Les zones de la pression élevée restent les mêmes.

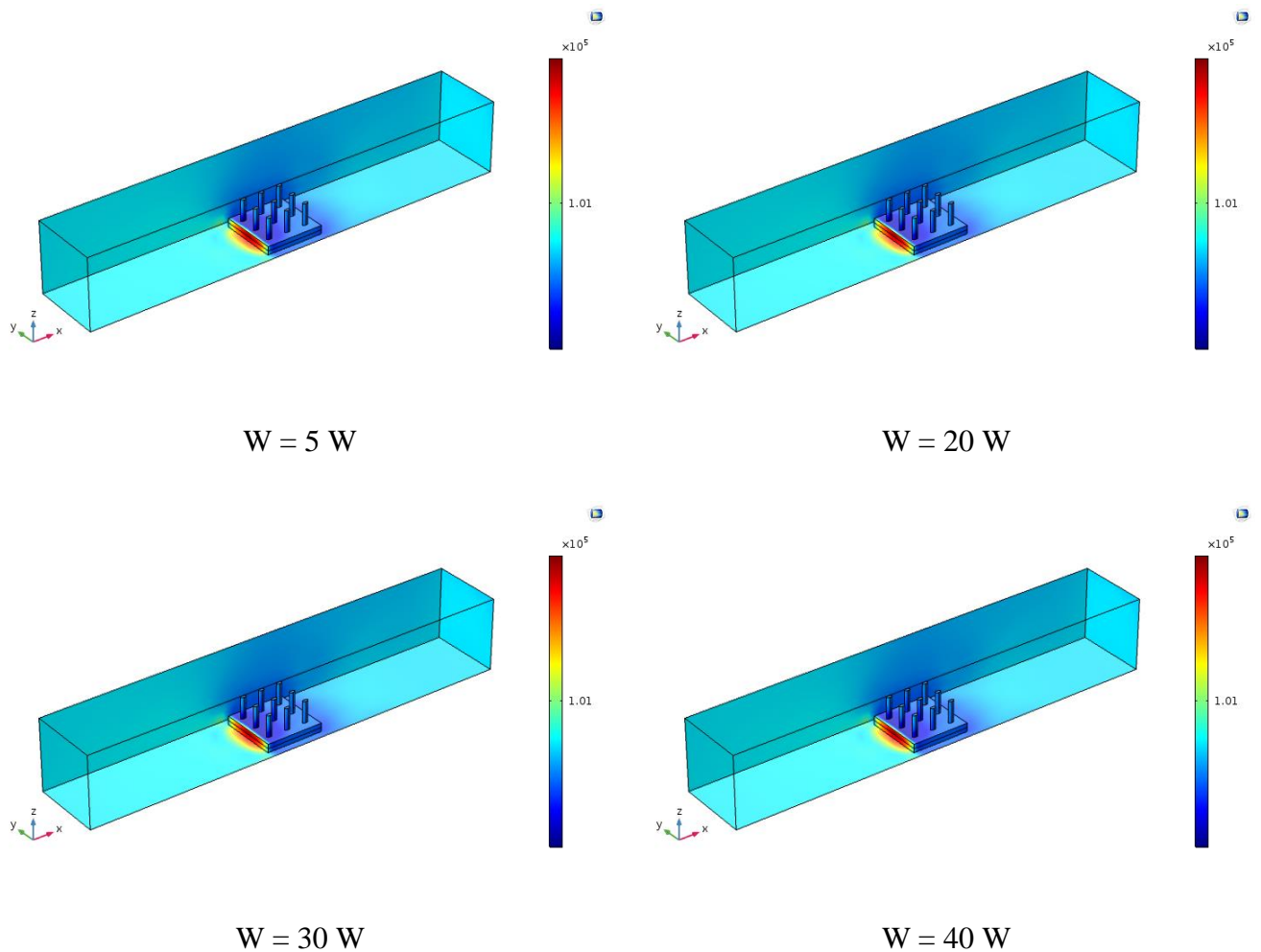


Figure (V.13) : distribution de la pression à travers le dissipateur thermique pour différentes valeurs de flux de chaleur $q = 5, 20, 30$ et 40 W , et vitesse de l'air $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

V.7.9 Effet du flux dissipé sur la distribution de la vitesse

La figure (IV.14) illustre l'effet de l'augmentation du flux de chaleur dissipé par la source de chaleur $q = 5, 10, 20$ et 40 W sur la distribution de la pression au sein du canal pour une vitesse à l'entrée du canal $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$. On observe de cette figure, l'effet de l'augmentation du flux de chaleur dissipé par la source de chaleur sur la distribution de la vitesse est très peu remarquable aux différentes zones du canal.

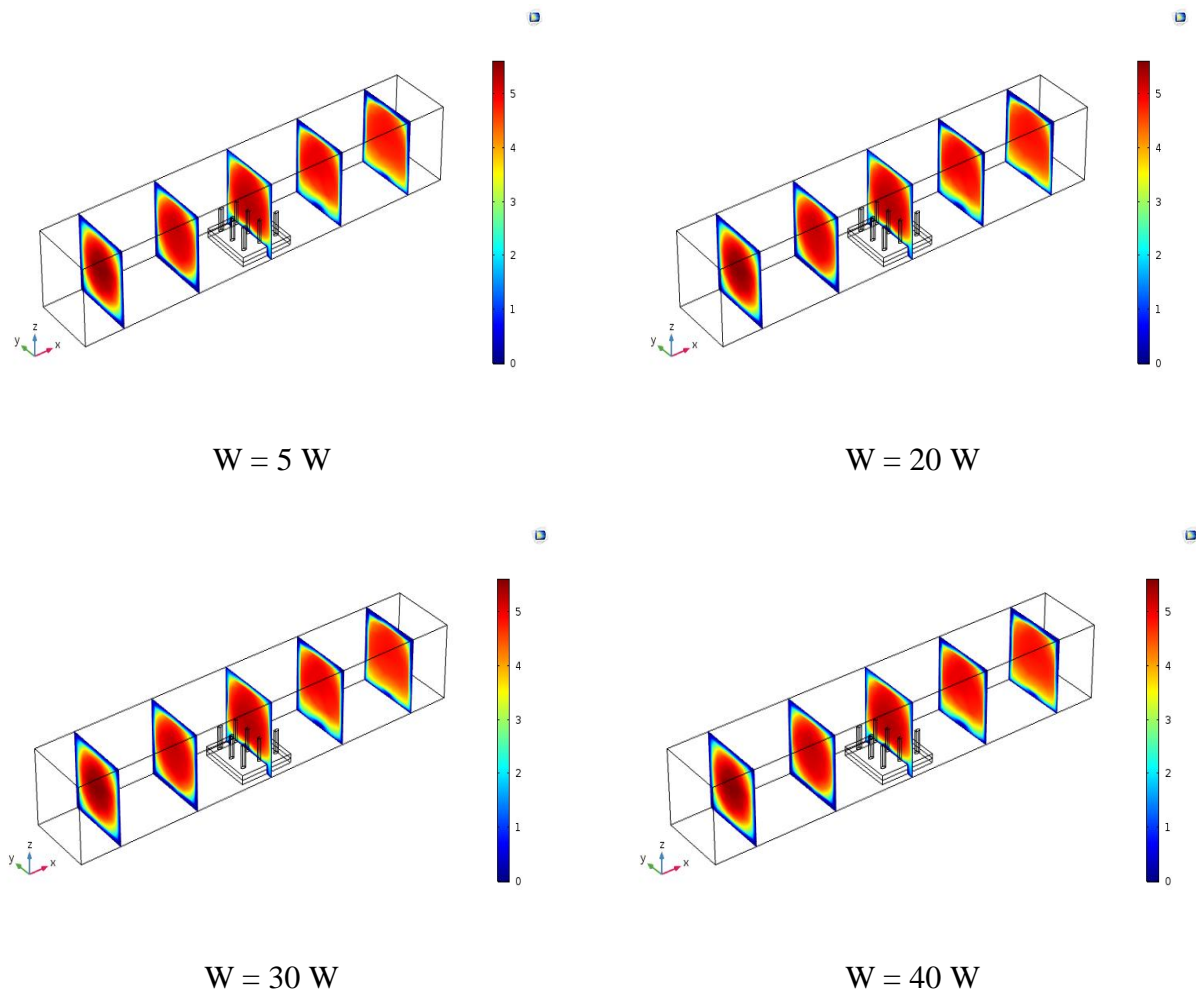


Figure (V.14) : distribution de la vitesse à travers le dissipateur thermique pour différentes valeurs de flux de chaleur $q = 5, 20, 30$ et 40 W , et vitesse de l'air $U_0 = 3.6 \text{ m/s}$.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous présentons une simulation numérique 3D du comportement thermo hydraulique d'un dissipateur thermique à ailettes elliptiques en mousse d'aluminium au sein d'un canal horizontale. Le dissipateur thermique est alimenté par un flux de chaleur constant généré par un composant électronique situé en-dessous. Cette simulation numérique permet de déterminer la distribution de la température, la pression et la vitesse à travers le dissipateur thermique et aussi permet d'évaluer l'effet de quelques paramètres de fonctionnement comme le nombre d'ailettes elliptiques, la vitesse de l'air et flux de chaleur dissipé par le composant électronique.

Les résultats de la simulation numérique ont montré:

- L'augmentation de nombre d'ailettes il a l'effet inverse sur le transfert de chaleur du dissipateur thermique.
- Lors de l'utilisation des ailettes elliptiques, nous ne remarquons pas de chute de pression significative.
- Une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air contribue à une augmentation progressive du coefficient de transfert de chaleur au sein du dissipateur.
- Le flux de chaleur dissipé va augmenter la température du système et il atteint des valeurs inacceptables

Les références

Les références

- [1] H.W.Wu and S.W.Peng. "effet of an oblique plate on the heat transfer enhancement of mixed convection over heated blocks in horizontal channel". *International journal of Heat and Mass transfer*, vol.42, pp. 1217-1235, 1999.
- [2] T.I.Young and K.Vafai, "convective cooling heatd obstacle in a channel". *International Journal of Heat and Mass transfer*, vol. 41, pp. 3131-3148, 1998.
- [3] M.A.Belmiloud "effet d'un dissipateur de chaleur sur le refroidissement des composants électroniques". *Revue des energies renouvelables* vol. 21 N°4 (2018) 529-536.
- [4] A.Bouttout and R.Bessaih, "steady and scillatory natural convection air cooling of protruding thermal sources mounted in a rectangular enclosure ", *Journal of Energy. Heat and Mass transfer*, vol. 30, pp. 251-271, 2008.
- [5] Ibrahim Mjallal, Hussein Farhat, Mohammad Hammoud* , Samer Ali, Ali AL Shaer and Ali Assi. "Cooling Performance of Heat Sinks Used in Electronic Devices ". *Researchgate* 2017.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201817102003>
- [6] Medjahed, Driss & Ameer, Houari & Guessab, Ahmed & Abdelkader, Aris. " Étude numérique et expérimentale des dissipateurs thermiques commercialises dans l'industrie électronique". *Researchgate*, (2017).
- [7] Buonomo B., Manca O., Marinelli L., and Nardini S., "Mixed convection in horizontal channels heated below with external heat losses on upper plate and partially filled with aluminum foam", in "5th International Conference on Porous Media and Their Applications in Science, Engineering and Industry, Eds, ECI Symposium Series, Volume, (2014) .
- [8] Sparrow EM, Charmchi M. Laminar heat transfer in the externally finned circular tubes. *J Heat transfer* 1980; 102: 605–11.
- [9] Soliman HM, Chau TS, Trupp AC. Analysis of laminar heat transfer in internally finned tubes with uniform outside wall temperature. *J Heat Transfer* 1980; 102: 598–604.

Les références

- [10] Agrawal AK, Sengupta S. Laminar flow and heat transfer in a finned tubeannulus. *Int J Heat Fluid Flow* 1990; 11(1): 54–9.
- [11] Huang P. C., and Vafai, K., “Analysis of Forced Convection Enhancements in a Channel Using Porous Blocks”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 563- 573, (1994).
- [12] Hadim A.,“Forced Convection in a Porous Channel with Localized Heat Sources”, *J Heat Transfer*, Vol. 116, pp.465–471,(1994).
- [13] Rachedi R. and Chikh S., “Enhancement of Electronic Cooling by Insertion of Foam Materials”, *Heat Mass Transf*, Vol. 37, pp.371–378,(2001).
- [14] Kurtbas I. and Celik N., “Experimental Investigation of Forced and Mixed Convection Heat Transfer in a Foam-Filled Horizontal Rectangular Channel”, *Int. J. Heat Mass Transfer* ,Vol. 52 , pp.1313– 1325,(2009).
- [15] Chen C.C., Huang P.C., Hwang H.Y., "Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 58:356–373, (2013)
- [16] : Jonathan Dairon, “Développement d’une nouvelle technique d’élaboration de mousses d’acier par fonderie et caractérisation mécanique, Thèse“
- [17] : Thierry Dillard. Caractérisation et simulation numérique du comportement mécanique des mousses de Nickel : morphologie tridimensionnelle, réponse élastoplastique et rupture.These de doctorat. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Mines de Paris, 2004.
- [18] : John Banhart., Denis Weaire. *On the Roab Again: Metal foams* find favour,American Institue of physics, pp. 205-207, 2002.
- [19] : Benjamin Sosnick. *Process for macking foam like mass of metal*, UnitedStates PatentNo.2, pp. 434-775, 1998.
- [20] : Kovacik J., Tobolka P., Simanik F. *Metal foams and porous metal structures*.In: Editor.Int.Conf., Germany, 14-16, pp 405, 1999.
- [21] : Ashby MF. Evans AG., Gibson L J., Hutchinson J W., Wadley HNG. *Metalfoams: a design guide*.Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.

Les références

- [22] : John Banhart; Manufacture. Caracrisation and application of cellular metalsand metalfoams, Progress in Materials Science 46, pp. 559-632, 2001.
- [23] : Bram M., Stiller C., Buchkremer HB., Stover D., Bauer H. AdvancedEngineeringMaterials 2000; 2: 196.
- [24] : Souhail Youcef. Etude par thomographie X et modélisation par éléments finis du comportement mécanique des mousses solides. These de doctorat, Insitut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2004.
- [25] : C. Curado, J. Ferreira, B. Lefevre, J. Picot, “ Technologie des matériaux métalliques,Projet MA15, Université de technologie de Troyes“.
- [26] : [https://fr.wikipedia.org/wiki /Mousse métallique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse_métallique)
- [27] [: J.P.Bonnet, Phénomènes de transport dans les mousses métalliques : approche expérimentale de l'écoulement monophasique et liquide-gaz. Thèse Mécanique-Energétique, Université de Provence Aix- Marseille, 1. 21 Novembre 2007.
- [28] Mousse métalliques.[document électrique].Troyes, UTT,
<http://docplayer.fr/stroage/29/13883040/1528074267/28K26MbKpd8gZpTXV96gZQ/13883040.pdf>.
- [29] Arouri fethia "Elaboration et caractésation des mousses métalliques". Thèse de magister.Science et génie des matériaux.14-05-2009
- [30] Ouyana Abdel Moumene "Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement tachin- lait, Candia", thèse Master –Installations Energétique et turbomachines. 10-07-2019, P18- 20.
- [31] <https://www.esprocus.com/>
- [32] Daou seddik et Amenouche samir "Etude numérique de refroidissement des composantes électroniques ", Master –Installations Energétique et turbomachines. 07-10-2021, P 05.
- [33] "Power Supply Glossary". Aegis Power Systems, Inc. Aegis Power Systems, Inc. Retrieved 15 September 2014.

Les références

- [34] Elberg , S . , et Mathonnet , P . Evacuation de la chaleur dissipée dans les équipements électroniques, Eyrolles , Paris , Edition 1978.
- [35] Sebaa Kamel et Bennouri Imed, « Simulation Numérique d'un dissipateur thermique à disques empilés en mousse d'aluminium ». Thèse Master construction mécanique . Université abbes laghrour- khenchela . 10-09-2020.
- [36] Yongtong Li , Liang Gong, Minghai Xu , Yogendra Joshi , « Enhancing the performance of aluminum foam heat sinks through integrated pin fins », Int. J. of Heat and Mass Transfer, (2020).
- [37] Pauline Riviere “ Simulation de la réplication de microstructure en polymère par moulage à injection”, canada .2020.
- [38] Mariem ben hamouda “Etude conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques”, université de QUEBEC, mars 2015.
- [39] A. Mekhnache, R. Cedrati ; Les échangeurs de chaleur ; séminaire ; centre des Techniques appliquées de SKIKDA ; 2006 ; 86 p.
- [40] B. Cherif, «Calcul et technologie des échangeurs de chaleur », office des publications universitaires 2012.

Les références
