

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب

Université – Ain Temouchent BELHADJ Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de génie mécanique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de master en : Génie mécanique Energétique.

Domaine : Science et technologie.

Filière : Génie mécanique.

Spécialité : Energétique.

Thème :

## **Modélisation analytique 3D d'un dissipateur de chaleur à ailettes à plaques**

**Présenté par :**

- 1) Melle. ZEHOUANI Zahra Assala.
- 2) Melle. METTIOUI Ghizlene Mansouria.

**Devant le jury composé de :**

Dr. NEHARI Tayeb.	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BERREZOUG Imane.	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BELHAMIANI Mohamed.	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

# *Remerciement*

En premier nous exprimons notre grande reconnaissance au DIEU le tout puissant et miséricordieux, d'avoir nous donner la force, la volonté, la patience et le courage durant toutes ces années d'études, d'avoir nous guider et aider pour achever ce travail après tant d'efforts déployés durant ces années.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur : Dr. BELHAMIANI Mohamed, pour sa patience, ses encouragements ainsi que pour sa rigueur intransigeante qui nous a beaucoup appris. Nous remercions en lui l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui cette mémoire n'aurait jamais vu le jour. Merci beaucoup Monsieur BELHAMIANI.

Nous souhaitons adresser nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin nous n'oublions pas d'adresser un remerciement chaleureux à tous ceux et celles de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, nous dis merci.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents pour leur amour, soutien et sacrifices.*

*A Maha ma chère sœur et ma confidente qui a toujours été le bon exemple de volonté et du travail sérieux.*

*A ma petite sœur Yasmina, mon frère Ali et mon oncle qui m'ont offert leur appui et encouragement.*

*A ma douce grand-mère pour les vœux qu'elle n'a pas cessé de formuler dans ses prières.*

*A mon binôme Ghizlene, mes amies Nadjet, Safaa, Wafaa, Khouloud et Houda pour leur support et motivation.*

*Et pour conclure ce modeste dédicace, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé partiellement et substantiellement à réaliser ce travail.*

*Assala*

# *Dédicaces*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie ce travail :*

*À mes très chers, respectueux et magnifiques parents pour qui je n'oublierai jamais leur grande affection, mon père et ma mère qui m'ont soutenu tout au long de ma vie pour leur patience, leur amour et leur encouragement, tout le long de mes études.*

*À mon frère << Moncef >> et mes sœurs << Kawtar et Maroua >> et aussi mon ange << Yasmîna >> sans oublier notre prince « Chahîne », en témoignage de la fraternité, avec mes souhaits de bonheur de santé et de succès.*

*Et à tous les membres de ma famille.*

*En témoignage de ma sincère amitié je dédie cette mémoire à :*

*<< Rachdî Soumia Chaherazed >>*

*Mon binôme, ma sœur et amie << Zehouani Zahra Assala >>*

*A tous mes très chers amis et mes collègues de ma filière génie mécanique énergétique.*

*A tous mes professeurs qui nous ont enseigné.*

*A tous ceux qui me sont chers et qui sont aujourd'hui absents.*

*Ghizlene*

## Résumé

---

### Résumé

Le refroidissement à haute performance est une exigence essentielle pour les microprocesseurs modernes qui génèrent de grandes quantités de chaleur distribuée de façon non uniforme. Les dissipateurs de chaleur ont traditionnellement été utilisés pour la gestion thermique. Dans cette étude, les effets de certains paramètres de conception sur les performances du dissipateur de chaleur à ailettes à plaques planes ont été analysés. Des simulations de transfert de chaleur ont été effectuées à l'aide du logiciel d'analyse d'éléments finis ABAQUS pour comprendre la variation du flux thermique et de la température du dissipateur de chaleur. Trois paramètres ont été variés ; le nombre des ailettes, le flux thermique et le matériau du dissipateur de chaleur, et une comparaison de la distribution du flux thermique et de la température entre le dissipateur de chaleur à ailettes pleines, rectangulaires et perforées a été réalisée. En fin, les résultats ont été discutés.

**Mots clés :** Dissipateur de chaleur, convection, ailettes, refroidissement.

### Abstract

High-performance cooling is an essential requirement for modern microprocessors that generate large amounts of non-uniform heat distribution. Heat sinks have traditionally been used for thermal management. In this study, the effects of certain design parameters on the performance of the flat plate heat sink were analyzed. Heat transfer simulations were performed using ABAQUS finite element analysis software to understand the variation in heat flux and temperature of the heat sink. Three parameters were varied: the number of fins, the heat flux and the material of the heat sink, and a comparison of the heat flux distribution and temperature between the full-finned, Rectangular and perforated heat sink was made. In the end, the results were discussed.

**Keywords:** Heat sink, convection, fins, cooling.

### ملخص

التبريد عالي الأداء هو شرط أساسي للمعالجات الدقيقة الحديثة التي تولد كميات كبيرة من التوزيع الحراري غير الموحد. تم استخدام مصارف الحرارة تقليدياً للإدارة الحرارية. في هذه الدراسة، تم تحليل تأثيرات بعض معلمات التصميم على أداء بالوعة حرارة الصفائح المسطحة. تم إجراء محاكاة نقل الحرارة باستخدام برنامج تحليل العناصر المحدودة لفهم التباين في التدفق الحراري ودرجة حرارة الحوض الحراري. تم تنويع ثلاثة معايير: عدد الزعانف، وتدفق الحرارة ومادة الحوض

## Résumé

---

الحراري، وتم إجراء مقارنة بين توزيع التدفق الحراري ودرجة الحرارة بين الحوض الحراري الكامل الزعانف، المستطيل والمنقّب. وفي النهاية، تمت مناقشة النتائج.

**الكلمات المفتاحية:** حوض الحرارة، الحمل الحراري، الزعانف، التبريد.

## Chapitre I : Généralités sur les dissipateurs de chaleur

I. Introduction.....	1
I.1. Transfert de chaleur.....	1
I.1.1. Modes de transfert de chaleur.....	1
• Conduction.....	1
• Convection.....	2
• Rayonnement.....	2
I.1.2. Notions thermiques.....	3
I.1.2.1. La résistance thermique.....	3
I.1.2.2. La conductivité thermique.....	3
I.1.2.3. Le coefficient de convection thermique.....	4
I.1.3. Les nombres adimensionnels.....	4
I.2. Les aspects thermiques des composants électroniques.....	6
I.2.1. Caractéristiques thermiques.....	6
I.2.2. L'échauffement des composants électroniques.....	7
I.2.2.1. Causes de la surchauffe des composants électroniques.....	8
I.2.2.2. Effets de la surchauffe des composants électroniques.....	9
I.3. Les principales techniques de refroidissement utilisées en électronique.....	9
I.3.1. Refroidissement à air.....	9
I.3.2. Refroidissement par liquide caloporteur.....	11
I.3.3. Refroidissement par jets.....	13
I.3.4. Refroidissement par spray.....	13
I.3.5. Refroidissement par caloducs.....	14
I.4. Les dissipateurs de chaleur à ailettes.....	14
I.4.1. Les ailettes.....	14
I.4.1.1. Les différents types des ailettes.....	15
I.4.1.2. Paramètres de performances des ailettes.....	16

## Sommaire

---

I.4.1.3. Choix des ailettes.....	17
I.4.2. Les dissipateurs de chaleur.....	17
I.4.2.1. Le principe de fonctionnement des dissipateurs de chaleur.....	18
I.4.2.2. Classification des dissipateurs de chaleur.....	19
I.4.2.2.1. Classés par flux d'air.....	19
I.4.2.2.2. Classés par processus de fabrication.....	19
I.4.2.3. Types des dissipateurs de chaleur.....	21
I.4.2.3.1. Dissipateurs thermiques à ailettes à plaques.....	21
I.4.2.3.2. Dissipateurs thermiques à ailettes épinglées.....	21
I.4.2.3.3. Les dissipateurs de chaleur compacts.....	23
I.4.2.3.4. Les dissipateurs de chaleur à ailettes perforées.....	23
I.4.2.4. Les paramètres de conception des dissipateurs de chaleur.....	24
I.5. Techniques d'amélioration du transfert de chaleur.....	25
I.5.1. Techniques passives.....	25
I.5.2. Techniques actives.....	26
I.5.3. Techniques composées.....	28
I.6. Conclusion.....	28

## **Chapitre II : Revue bibliographique sur les dissipateurs de chaleur**

II. Introduction.....	30
II.1. Revue bibliographique.....	30
II.2. Optimisation des dissipateurs de chaleur.....	40
II.2.1. Optimisation des dissipateurs de chaleur avec ébullition.....	40
II.2.2. Optimisation du dissipateur thermique par l'utilisation de milieux poreux.....	42
II.2.3. Optimisation des dissipateurs thermiques par l'utilisation de turbulateurs.....	43

## Sommaire

---

II.2.4. Optimisation des dissipateurs thermiques par fluide de travail.....	45
II.3. Dissipateur de chaleur optimisé pour la topologie.....	47
II.4. Conclusion.....	48

### Chapitre III : Résolution numérique

III. Introduction.....	51
III.1. Présentation de logiciel de simulation.....	51
III.2. Méthode des éléments finis.....	52
III.2.1. Démarche éléments finis.....	52
III.3. Description du problème.....	54
III.3.1. Dissipateur de chaleur à ailettes planes.....	55
III.3.2. Microprocesseur.....	56
III.4. Equation gouvernantes.....	56
III.5. Les conditions aux limites.....	57
III.6. Indépendance du maillage.....	58
III.7. Cas étudiés.....	59
III.7.1. Variation du nombre des ailettes.....	59
III.7.2. Variation du matériau du dissipateur thermique.....	59
III.7.3. Variation du flux de chaleur.....	60
III.7.4. Perforation des ailettes.....	60
III.7.5. Dissipateur de chaleur à ailettes rectangulaires.....	60
III.8. Interprétation des résultats.....	61
III.8.1. Effet du nombre des ailettes.....	61
III.8.2. Effet du matériau du dissipateur thermique.....	62
III.8.3. Effet du flux de chaleur.....	64

## Sommaire

---

III.8.4. Effet de la géométrie .....	66
III.9. Conclusion.....	67

## Liste des figures

---

### Chapitre I

<b>Figure I.01</b> : Transfert thermique entre deux surfaces ( $T_2 > T_1$ ).....	2
<b>Figure I.02</b> : Illustration d'échange convectif entre un milieu fluide et une surface.....	2
<b>Figure I.03</b> : Le principe du rayonnement thermique.....	3
<b>Figure I.04</b> : Transfert de chaleur à travers un cylindre : (a) distribution de la température, (b) circuit thermique équivalent.....	3
<b>Figure I.05</b> : Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels.....	4
<b>Figure I.06</b> : Composant semi-conducteur.....	6
<b>Figure I.07</b> : Les principales causes de panne des composants électroniques.....	8
<b>Figure I.08</b> : Chaleur dans l'électronique.....	8
<b>Figure I.09</b> : Système de refroidissement à air passif.....	10
<b>Figure I.10</b> : Système de refroidissement par air.....	10
<b>Figure I.11</b> : La pompe piézoélectrique et son principe de fonctionnement.....	11
<b>Figure I.12</b> : Exemple d'un refroidissement régulier à liquide configuré pour un ordinateur...	11
<b>Figure I.13</b> : Refroidissement liquide à plaque froide.....	12
<b>Figure I.14</b> : Refroidissement par convection dans des canaux.....	12
<b>Figure I.15</b> : Mécanismes de transfert de chaleur en refroidissement par pulvérisation.....	13
<b>Figure I.16</b> : Schéma de caloduc classique.....	14
<b>Figure I.17</b> : Principe des ailettes.....	15
<b>Figure I.18</b> : Différentes formes d'ailettes.....	16
<b>Figure I.19</b> : Principe de fonctionnement d'un dissipateur de chaleur.....	18
<b>Figure I.20</b> : Dissipateur de chaleur passif (a) et actif (b).....	19
<b>Figure I.21</b> : Dissipateurs thermiques à ailettes à plaques (A) et à plaques rectangulaire (B)...	21
<b>Figure I.22</b> : Dissipateur thermiques à ailettes épinglées.....	21

## Liste des figures

---

<b>Figure I.23</b> : Différents types de dissipateurs thermiques à ailettes épinglees.....	22
<b>Figure I.24</b> : Dissipateurs de chaleur compacts : (a) à ailettes à plaques, (b) à goupille circulaire, et (c) à plaques carrés.....	23
<b>Figure I.25</b> : Dissipateurs thermiques : (A) à ailettes à plaques perforées, (B) à ailettes pliées perforées et (C) à ailettes épinglees perforées.....	24
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure II.01</b> : Le modèle géométrique (a) profil sans congé (b) profil de congé.....	30
<b>Figure II.02</b> : La surface du test.....	31
<b>Figure II.03</b> : La structure et la conception du dissipateur thermique.....	31
<b>Figure II.04</b> : Configurations schématiques des dissipateurs thermiques.....	32
<b>Figure II.05</b> : Le schéma du dissipateur thermique étudié.....	33
<b>Figure II.06</b> : Ailettes à perforations circulaires, losanges et elliptiques.....	33
<b>Figure II.07</b> : Schéma du DL-MCHS avec différentes formes de section transversale de micro-canal : (a) triangulaire ; (b) rectangulaire ; (c) circulaire ; (d) trapézoïdal ; (e) de forme rentrante.....	34
<b>Figure II.08</b> : Dimensions géométriques des micro-ailettes à broches.....	35
<b>Figure II.09</b> : Schémas du (a) MC-SCRR et (b) MC-RC.....	35
<b>Figure II.10</b> : Les six modèles d'ailettes examinés.....	36
<b>Figure II.11</b> : Schéma des dissipateurs de chaleur radiaux avec anneau perforé.....	36
<b>Figure II.12</b> : Structure de quatre modèles de dissipateurs thermiques à micro-canaux.....	37
<b>Figure II.13</b> : Schéma d'une configuration d'un dissipateur épingle.....	38
<b>Figure II.14</b> : Disposition en grille pour diverses ailettes perforées.....	38
<b>Figure II.15</b> : Le modèle computationnel.....	39
<b>Figure II.16</b> : Représentation schématique du dissipateur thermique avec une source de chaleur occupée (1) base entière et (2) base partielle.....	40
<b>Figure II.17</b> : Vue de la section d'essai.....	41

## Liste des figures

---

<b>Figure II.18</b> : Illustration schématique du MCHS poreux proposé.....	42
<b>Figure II.19</b> : Schéma du canal partiellement rempli de milieux poreux à trois couches.....	43
<b>Figure II.20</b> : Représentation schématique du microchannel avec turbulateurs décalés.....	44
<b>Figure II.21</b> : Schéma du dissipateur de chaleur à ailettes nervurées.....	44
<b>Figure II.22</b> : Schéma du dissipateur thermique à micro-aillettes à broches.....	46
<b>Figure II.23</b> : Les dimensions du dissipateur thermique.....	46
<b>Figure II.24</b> : Modèles CAD des dissipateurs thermiques.....	47
<b>Figure II.25</b> : Dissipateur thermique optimisé pour la topologie 3D avec fraction volumique..	48

## Chapitre III

<b>Figure III.01</b> : Erreur de discrétisation géométrique.....	53
<b>Figure III.02</b> : Géométrie du dissipateur de chaleur.....	55
<b>Figure III.03</b> : Le microprocesseur étudié.....	56
<b>Figure III.04</b> : Conditions aux limites appliquées sur le microprocesseur.....	58
<b>Figure III.05</b> : (a) résultats du test de maillage, (b) maillage finale.....	58
<b>Figure III.06</b> : Cas de dissipateur de chaleur avec : (a) 5 ailettes, (b) 10 ailettes et (c) 15 ailettes.....	59
<b>Figure III.07</b> : Dissipateur de chaleur étudié.....	60
<b>Figure III.08</b> : Dissipateur de chaleur étudié.....	60
<b>Figure III.09</b> : Path étudié.....	61
<b>Figure III.10</b> : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur avec 5 ailettes.....	61
<b>Figure III.11</b> : Effet de la variation du nombre des ailettes.....	62
<b>Figure III.12</b> : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en Aluminium.....	63

## Liste des figures

---

<b>Figure III.13</b> : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en cuivre.....	63
<b>Figure III.14</b> : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en graphène.....	63
<b>Figure III.15</b> : Effet de la variation du matériau du dissipateur de chaleur.....	64
<b>Figure III.16</b> : Distribution de la température ; (a) cas de flux $Q = 25000 \text{ W/m}^2$ ; (b) cas de flux $Q = 50000 \text{ W/m}^2$ et (c) cas de flux $Q = 75000 \text{ W/m}^2$ .....	65
<b>Figure III.17</b> : Effet de la variation du flux de chaleur.....	65
<b>Figure III.18</b> : Distribution du flux et de la température pour le dissipateur de chaleur à ailettes perforés.....	66
<b>Figure III.19</b> : Distribution du flux et de la température pour le dissipateur de chaleur à ailettes rectangulaire.....	66
<b>Figure III.20</b> : Effet des perforations des ailettes.....	67

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I

**Tableau I.1** : Classification des dissipateurs thermiques par processus de fabrication.....20

**Tableau I.2** : Comparaison entre les dissipateurs thermiques à plaques et épinglées.....22

### Chapitre III

**Tableau III.1** : Dimensions du dissipateur à ailettes planes.....55

**Tableau III.2** : Dimensions du microprocesseur.....56

**Tableau III.3** : Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.....59

# Nomenclature

---

## Symboles

### Symboles Latins

$A_t$	Aire transversale de l'ailette (à la base)	$[m^2]$
$A_{tot}$	Aire totale de la surface de l'ailette	$[m^2]$
$C$	La vitesse du fluide	$[m.s^{-1}]$
$C_p$	La capacité thermique massique à pression constante	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
$D_e$	Domaine élémentaire	
$D_h$	Diamètre hydraulique	$[m]$
$E$	Le vecteur champ électrique	$[N.C^{-1}]$
$J$	La densité (surfactive) de courant électrique	$[A.m^{-2}]$
$g$	Accélération de la pesanteur	$[m.s^{-2}]$
$h$	Le coefficient de transfert de chaleur convectif	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
$Ke$	Raideur	$[N.m^{-1}]$
$L_c$	Longueur caractéristique	$[m]$
$M_e$	Matrice masse alimentaire	$[Kg]$
$N$	La matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément.	
$P_{ec}$	Puissance dissipée par effet joule	$[W]$
$Q_{ailette}$	Taux de transfert de chaleur de l'ailette	$[W]$
$q$	Le vecteur courant de chaleur (ou densité de flux de chaleur)	$[W.m^{-2}]$
$R$	Résistance thermique	$[K.W^{-1}]$
$r$	Le terme source volumique	$[Kg.m^{-3}]$
$S$	Aire de la surface de contact solide/fluide	$[m^2]$
$s$	Aire de la section de passage du flux de chaleur (surface)	$[m^2]$

## Nomenclature

---

S	Aire de la surface	[m]
T <sub>s</sub>	Température la surface solide	[K]
T <sub>f</sub>	Température de fluide loin de la surface solide	[K]
T <sup>4</sup>	Température du milieu environnant la surface	[K]
T <sub>∞</sub>	Température du fluide	[K]
ΔT	La différence de température	[K]
u*(M)	La valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément.	
u <sub>n</sub>	Variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément.	
δ $\vec{u}$	Le champ des déplacements virtuels.	
$\ddot{u}$	Le champ des déplacements.	
x	Variable d'espace dans la direction du flux	[m]

## Symboles Grecs

α	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
β	Coefficient de dilatation thermique volumétrique	[K <sup>-1</sup> ]
δ	Constante de Stefan	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]
ε	Efficacité d'une ailette.	
ε	Facteur d'émission de la surface.	
η	Rendement d'une ailette.	
Φ	Flux thermique	[W]
λ	Conductivité thermique du milieu	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
μ	La viscosité dynamique du fluide	[Kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
ν	La viscosité cinématique du fluide	[m <sup>2</sup> .s]
ρ	La masse volumique de fluide	[Kg.m <sup>-3</sup> ]

## Nomenclature

---

### Les nombres adimensionnels

Re	Le nombre de Reynolds.
Nu	Le nombre de Nusselt.
Pr	Le nombre de Prandt.
Gr	Le nombre de Grashof.
Ri	Le nombre de Richardson.
Ra	Le nombre de Rayleigh.

### Abréviations

PF-5060	Performance fluide 3M™.
R134a	Tétrafluoroéthane.
LED	Les diodes électroluminescentes.
SOA	La zone d'exploitation sécuritaire.
MCP	Un matériau à changement de phase.
HHFHS	Un dissipateur thermique à ailettes hybrides creuses rondes.
MCHS	Dissipateur thermique micro-canaux.
MCPH	Dissipateurs thermiques des matériaux à changement de phase
DL-MCHS	Dissipateur thermique à micro canaux à double couche.
MPFHSs	Les dissipateurs thermiques à ailettes à micro-broches.
MC-SCRR	Dissipateur thermique à micro-canaux avec cavités sinusoïdales et nervures rectangulaires.
MC-RR	Le micro-channel à nervures rectangulaires.
MC-SC	Le micro-channel à cavités sinusoïdales.
TMC	Dissipateur thermique à micro-canaux traditionnels.

## Nomenclature

---

FEA	Analyse par éléments finis.
CHF	Le flux thermique critique.
PFHS	Dissipateur thermique à ailettes à plaques.
RPFHS	Dissipateur thermique à ailettes nervurées.
TO	Optimisation de topologie.
AM	Fabrication additive.
DMLS	Le frittage direct au laser.
TCE	La capacité des amplificateurs de conductivité thermique.
ALM	L'approche de fabrication de couches additives.

# **Introduction**

## **Générale**

# Introduction générale

La gestion thermique de l'électronique et de l'électronique de puissance a de vastes applications dans plusieurs industries telles que l'industrie des télécommunications, l'industrie automobile (véhicules hybrides, véhicules électriques), les systèmes d'énergie renouvelable (panneaux solaires et électronique d'énergie éolienne) et l'industrie aérospatiale.

Tous les équipements électroniques dépendent de la circulation et du contrôle du courant électrique pour effectuer une variété de fonctions. Chaque fois que le courant électrique traverse un élément résistif, de la chaleur est générée. En ce qui concerne le bon fonctionnement de l'électronique, la dissipation de chaleur est l'un des aspects les plus critiques à prendre en considération lors de la conception d'un boîtier électronique. La majorité des pannes pendant le fonctionnement de ces composants ont une racine thermique. En général, plus la température et le changement de température par rapport au temps sont faibles, mieux ils sont. La conduction, la convection naturelle ou le rayonnement, refroidissent les composants dans une certaine mesure tandis que les appareils électroniques d'aujourd'hui ont besoin de systèmes plus puissants et plus compliqués pour faire face à la chaleur. Par conséquent, de nouveaux dissipateurs de chaleur avec des surfaces étendues plus grandes, des matériaux très conducteurs et un débit de liquide de refroidissement plus élevé sont essentiels pour réduire les points chauds.

Le but principal d'un dissipateur thermique est de réduire la température des composants électroniques qui y sont attachés. L'excès de chaleur est transféré à un autre milieu, généralement de l'air. De cette manière, les défaillances liées à la chaleur des composants électroniques peuvent être évitées. Traditionnellement, les dissipateurs thermiques ont plusieurs ailettes, qui sont des surfaces minces s'étendant à partir de la base du dissipateur thermique. La puissance thermique du composant électronique est transportée vers ces ailettes par conduction, et l'air ambiant capte cette énergie thermique par convection. Plusieurs aspects de la conception sont importants pour garantir que le dissipateur thermique dissipe efficacement la chaleur. La plupart des facteurs qui déterminent l'efficacité d'un dissipateur thermique sont liés à sa structure, par exemple, une surface active plus grande, le type de matériau utilisé, la forme générale ou la forme d'éléments distincts du dissipateur thermique.

Le dissipateur de chaleur le plus couramment utilisé en électronique de puissance est le dissipateur à ailettes planes, qui peuvent être réalisés de plusieurs façons : par extrusion, par

## Introduction générale

---

usinage, par moulage. En effet, c'est celui qui présente le plus grand nombre d'avantages : il est facile à produire en série et à faible coût, c'est un dispositif robuste et fiable. C'est pourquoi nous avons choisi de nous focaliser sur ce type de dissipateur. Ce travail donc présente une analyse des performances d'un dissipateur thermique à ailettes planes. Des simulations de transfert de chaleur ont été effectuées à l'aide du logiciel d'analyse d'éléments finis ABAQUS, dont l'objectif est d'analyser l'effet des différents paramètres y compris : le nombre des ailettes, la perforation des ailettes, le flux de chaleur appliqué sur le microprocesseur et le matériau du dissipateur thermique sur la distribution du flux et de la température du dissipateur de chaleur.

Ce mémoire est donc constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une recherche bibliographique sur le transfert de chaleur, le problème d'échauffement des composants électroniques : ses causes et ses effets, et les différents systèmes de refroidissement utilisés pour éviter ce problème. Les dissipateurs de chaleur qui présentent la solution de refroidissement la plus largement appliquée dans l'industrie sont également présentés dans ce chapitre, ainsi que les ailettes.

Le second chapitre présente un résumé des efforts de recherche consacrés au développement de la performance thermique des dissipateurs de chaleur au cours des dernières années.

Le troisième chapitre est le chapitre le plus important de cette étude, la procédure de simulation numérique en utilisant le logiciel d'analyse ABAQUS est exposé ainsi que la méthode des éléments finis. Nous avons présenté le problème étudié et les différentes géométries. A la fin, nous avons comporté les résultats numériques obtenus et leurs interprétations pour les différents cas étudiés.

Finalement, notre travail de master est achevé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et les perspectives qui seront dégagées de ce mémoire

**Chapitre I :**  
**Généralités sur les**  
**dissipateurs de**  
**chaleur**

## I. Introduction

Le comportement thermique des systèmes est problématique dans tous les domaines où il n'est pas possible d'assurer une ventilation correcte des composants. Et dans les systèmes embarqués ou confinés, c'est souvent le cas. La chaleur pourrait limiter les performances des composants et, par conséquent, réduire la fiabilité de l'appareil en termes de longévité et de coût. Pour cela, des systèmes de refroidissement en utilisant des dissipateurs de chaleur existent.

Le présent chapitre est donc une recherche bibliographique sur les différentes causes et effets de l'échauffement et les systèmes de refroidissement utilisés en électronique. Ainsi, les dissipateurs de chaleur, leur principe de fonctionnement et ses différents types.

### I.1. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est une discipline d'ingénierie qui concerne la production, l'utilisation, la conversion et l'échange de chaleur (énergie thermique) entre les systèmes physiques. C'est l'interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre deux corps.

#### I.1.1. Modes de transfert de chaleur

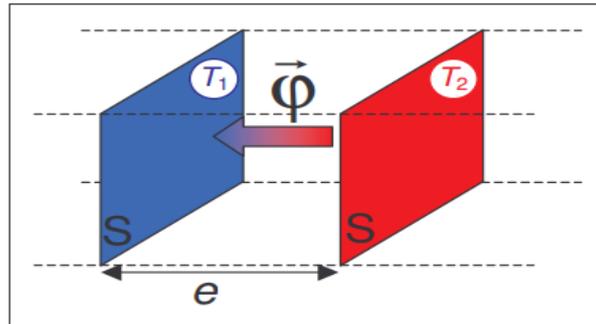
Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **Conduction**

La conduction est un transfert qui résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Il s'agit d'un transfert d'énergie spontané à petite échelle, dans un corps localement au repos. Elle peut avoir lieu dans les solides et dans une moindre mesure dans les fluides. On parlera de conducteur ou d'isolant de la chaleur. [1]

La loi de Fourier a été établie expérimentalement par Joseph Fourier en 1822. Cette loi stipule que le temps de transfert de chaleur à travers un matériau est proportionnel au gradient négatif de la température et à la surface, perpendiculairement à ce gradient, à travers lequel la chaleur circule. [2]

$$\Phi = - \lambda. S. \frac{dT}{dx} \quad (I.1)$$



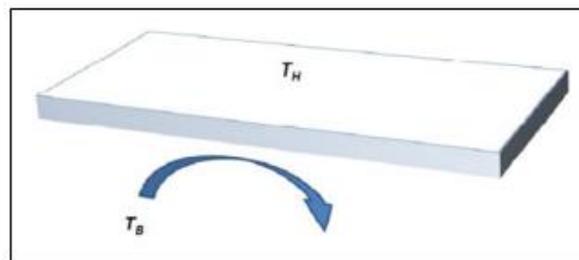
**Figure I.01** : Transfert thermique entre deux surfaces ( $T_2 > T_1$ ). [3]

- **Convection**

La convection est un transfert qui résulte d'un mouvement d'ensemble du matériau le supportant. La convection a donc lieu dans les fluides (gaz ou liquides). Elle est souvent caractéristique de l'échange à la frontière entre un solide et un fluide. Il convient de distinguer la convection forcée dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieur (pompe, ventilateur, ...) de la convection naturelle dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement et de la convection mixte. [1]

La loi de Newton représentée par l'équation ci-dessous introduit la relation entre le flux échangé entre la surface et le fluide et la surface d'échange :

$$\Phi = h. S. (T_s - T_f) \quad (I.2)$$



**Figure I.02** : Illustration d'échange convectif entre un milieu fluide et une surface. [4]

- **Rayonnement**

Le transfert de chaleur par rayonnement est le transport d'énergie dû à l'émission d'ondes électromagnétiques ou de photons à partir d'une surface ou d'un volume. Il ne nécessite pas de fluide caloporteur et peut se produire sous vide. Ce mode de transfert est décrit par la loi de Stefan. [5]

$$\Phi = \epsilon. \delta. S. T^4 \quad (I.3)$$

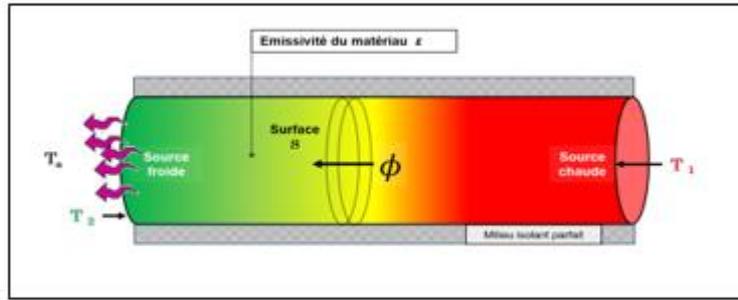


Figure I.03 : Le principe du rayonnement thermique. [2]

### I.1.2. Notions thermiques

#### I.1.2.1. La résistance thermique

La résistance thermique (R) est une propriété thermique qui mesure la résistance qu'une épaisseur de matériau oppose au passage de la chaleur. Elle constitue en fait son pouvoir isolant qui est d'autant plus fort que le R est élevé. Elle dépend du coefficient de conductivité thermique (lambda) du matériau et de son épaisseur. [6]

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} \tag{I.4}$$

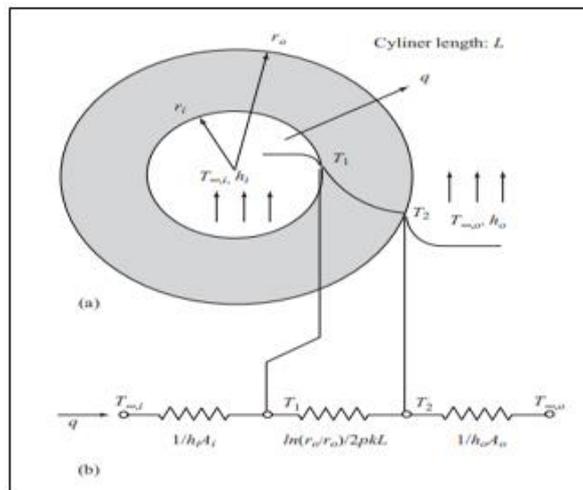
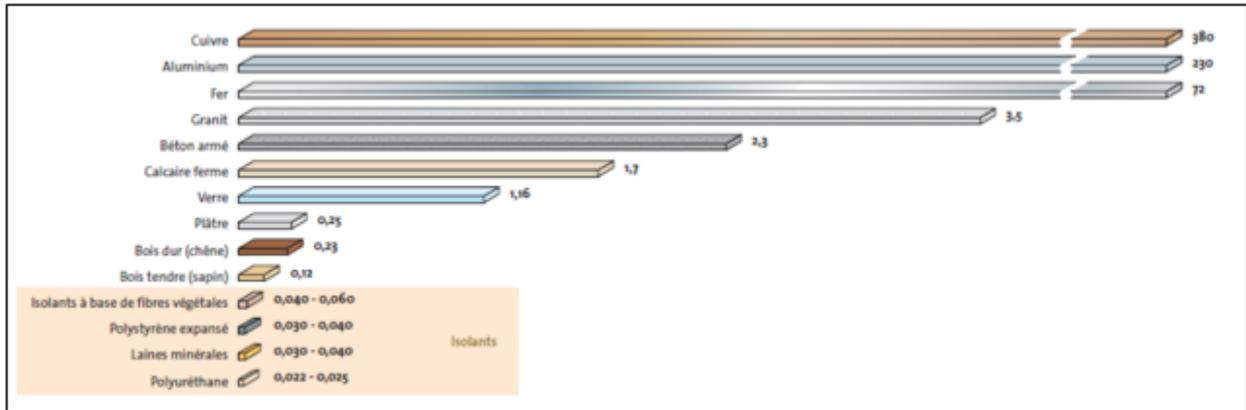


Figure I.04 : Transfert de chaleur à travers un cylindre : (a) distribution de la température, (b) circuit thermique équivalent. [7]

#### I.1.2.2. La conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est la grandeur qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle représente le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur d'un mètre, pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces entrante et sortante. [8]

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température, mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également. [8]



**Figure I.05 :** Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels. [9]

### I.1.2.3. Le coefficient de convection thermique

Le coefficient de transfert de chaleur convectif ( $h$ ) est un coefficient qui permet de quantifier un transfert de chaleur réalisé par un phénomène de convection au sein d'un fluide en mouvement. Il représente la résistance thermique d'une couche de fluide relativement stagnante entre une surface de transfert de chaleur et le milieu fluide. [10]

Il dépend de la nature du fluide et de celle de la paroi en contact, de la longueur et l'élément suivant lequel s'écoulent les courants de convection, de la vitesse de ces courants et, fréquemment, de la différence de température. [11]

### I.1.3. Les nombres adimensionnels

- **Le nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds détermine le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) qui influencera directement l'échange de chaleur. Si ce nombre est supérieur à 3200 ; le régime est donc turbulent, sinon, il est laminaire. [12]

$$Re = \frac{\rho C D_h}{\mu} = \frac{C D_h}{\nu} \quad (I.5)$$

Avec :

$\rho$  : La masse volumique de fluide ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ).

$C$  : La vitesse du fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

$D_h$  : Diamètre hydraulique (m).

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide ( $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

$\nu$  : La viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2.\text{s}$ ).

- **Le nombre de Nusselt**

Le nombre de Nusselt (Nu) traduit la qualité de l'échange thermique : une augmentation de ce nombre traduit une contribution importante de l'écoulement sur l'échange de chaleur avec la paroi. [13]

$$\text{Nu} = \frac{h.L}{\lambda} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique du fluide ( $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ).

$L$  : Longueur caractéristique (m).

- **Le nombre de Prandtl**

Le nombre de (Pr) compare l'aptitude du fluide à diffuser la quantité de mouvement par le biais de sa viscosité à son aptitude à diffuser la chaleur par le biais de sa diffusivité thermique. [13]

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{I.7})$$

- **Le nombre de Grashof**

Le nombre de Grashof (Gr) est défini comme le rapport des forces de flottabilité aux forces visqueuses et est utilisé pour déterminer le régime d'écoulement des couches limites fluides dans les systèmes laminaires. [14]

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ )

$\beta$  : Coefficient de dilatation.

$\Delta T$  : Différence de température (°C)

$L_c$  : Longueur caractéristique (m).

- **Le nombre de Richardson**

Le nombre de Richardson est le nombre sans dimension qui exprime le rapport de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique, il est utilisé pour déterminer la stabilité de l'écoulement dans un fluide stratifié. [14]

$$Ri = \frac{\text{Energie potentielle}}{\text{Energie cinétique}} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (I.9)$$

- **Le nombre de Rayleigh**

Le nombre de Rayleigh (Ra) pour un fluide est un nombre sans dimension associé à un écoulement entraîné par la flottabilité. Il est étroitement lié au nombre de Grashof, et les deux nombres sont utilisés pour décrire la convection naturelle (Gr) et le transfert de chaleur par convection naturelle (Ra). [15]

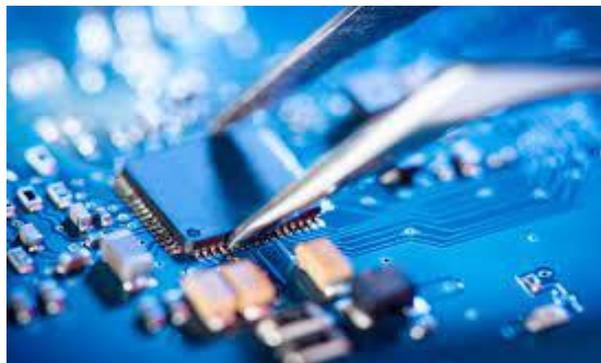
$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta\Delta T L_c^3}{\nu\alpha} \quad (I.10)$$

## I.2. Les aspects thermiques des composants électroniques

### I.2.1. Caractéristiques thermiques

- **Les composants à semi-conducteur**

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité entre les conducteurs (généralement les métaux) et les non-conducteurs ou les isolants (comme la plupart des céramiques). Ils peuvent être des éléments purs ou des composés, et ils ont un domaine de température de fonctionnement limité par la nature du matériau semi-conducteur et par le type de technologie employé lors de leur fabrication. [16]



**Figure I.06** : Composant semi-conducteur. [17]

Ces composants sont placés dans des boîtiers hermétiques : TO5, TO36, plat céramique, plastique...etc. Une très grande partie de l'énergie fournie est dissipée sous forme thermique au niveau de la jonction. Cette chaleur traverse presque en totalité la pastille puis la liaison pastille-boîtier et enfin le corps du boîtier par conduction. [18]

- **Les composants passifs**

Les composants passifs sont des dispositifs qui ne peuvent fournir aucun gain de puissance au circuit, ils peuvent même parfois par effet Joule réduire la puissance disponible en sortie. Ces éléments permettent de générer, d'adapter et de préserver les signaux tout au long d'un circuit. À cet égard, ils n'ont besoin d'aucune source d'énergie pour remplir leur fonction. [19]

Certains composants passifs ont également la capacité de stocker de l'énergie sous forme de tension ou de courant et de la libérer ultérieurement. Quelques exemples d'appareils passifs sont les résistances, condensateurs, bobines et transformateurs. [19]

- **Tubes cylindriques**

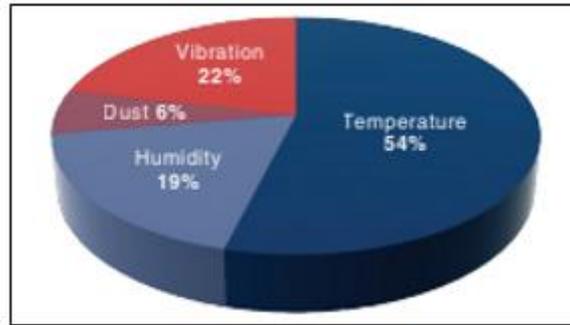
Le principe du tube électronique est basé sur l'effet thermoélectronique appelé plus souvent effet thermoïonique. Ils sont un type de tubes en verre, dont le gaz a été extrait, créant un espace vide. Ils sont composés d'électrodes conçues pour contrôler le flux d'électrons entre les électrodes scellées à l'intérieur des tubes à vide. [20]

Les tubes à vide utilisent une émission thermoélectrique principale dans laquelle un métal est chauffé, ce qui permet de desserrer les électrons. Cela provoque la charge positive des anodes pour attirer les électrons négatifs émis par les cathodes en provoquant un flux de courant électrique dans l'anode et hors de la cathode. [20]

### **I.2.2. L'échauffement des composants électroniques**

Les composants électroniques tels que les circuits intégrés, les résistances et les condensateurs, entre autres, sont conçus et construits pour résister à des quantités ou des niveaux de chaleur particuliers. Ils produisent de la chaleur en tant que sous-produit du fonctionnement normal. Outre, différentes situations internes et externes peuvent entraîner une surchauffe susceptible d'endommager un composant électronique. [21]

La figure ci-dessous montre que la température ainsi que l'humidité sont généralement les principales causes de panne des composants électronique.



**Figure I.07 :** Les principales causes de panne des composants électronique. [22]

### I.2.2.1. Causes de la surchauffe des composants électroniques

- Problème de conception et d'ingénierie :** Les appareils électroniques compacts à grande puissance et les composants électroniques miniaturisés sont susceptibles de surchauffer en raison de la petite surface et de la dimension limitée qui rend le transfert de chaleur moins efficace (plus les électrons sont emballés dans un petit morceau de semi-conducteur, plus les électrons dispersent les phonons ce qui empêche les phonons d'emporter la chaleur). D'autres exemples de problèmes de conception et d'ingénierie sont le câblage de contact défectueux et le couplage métaphysique, et le manque de contrôle de la qualité et de l'évaluation pendant la production des appareils électroniques. [22]



**Figure I.08 :** Chaleur dans l'électronique. [23]

- Les facteurs environnementaux :** Les conditions météorologiques fluctuantes ou les différences induites de température ambiante peuvent user et déchirer les composants électroniques. Aussi, l'humidité ou la teneur élevée en humidité de l'air ambiant, car la vapeur d'eau peut contaminer et éroder les composants métalliques ou causer un court-circuit. [21]

Les autres causes de surchauffe sont les mauvais contacts externes et le mauvais câblage qui peuvent entraîner des surtensions excessives et une dissipation de puissance, et l'utilisation

inappropriée d'un appareil électronique comme l'utilisation d'un dispositif auxiliaire incompatible (l'utilisation de câbles et d'adaptateurs d'alimentation non synchronisés, l'over-clocking des composants matériels des dispositifs informatiques, le stockage inapproprié et l'utilisation abusive...etc). [21]

### **I.2.2.2. Effets de la surchauffe des composants électroniques**

L'endommagement d'un composant électronique est l'effet potentiel et direct de la surchauffe. L'exposition à des niveaux de chaleur excessifs peut entraîner la rupture par fatigue de la surface de matériaux conducteurs comme le cuivre. [21]

D'autres effets de l'exposition à des niveaux excessifs de chaleur sont l'évaporation des métaux, ou d'autres matériaux qui utilisent le brasage ou le collage de différentes parties d'un composant électronique particulier ou d'un assemblage électronique. Néanmoins, ces effets sont révélateurs du fait que la surchauffe entraîne des changements dans les propriétés physiques et chimiques de constituants spécifiques trouvés dans un composant électronique. [21]

Les effets secondaires sont la dégradation matérielle des constituants réels et la défaillance subséquente du composant électronique. Les changements dans les propriétés physiques et chimiques affectent la performance ou en d'autres termes, le fonctionnement et la fonction d'un composant électronique. [21]

## **I.3. Les principales techniques de refroidissement utilisées en électronique**

Afin de résoudre les problèmes thermiques qui peuvent nuire au bon fonctionnement des circuits électroniques, on fait appel au refroidissement efficace afin d'améliorer la fiabilité et d'éviter les pannes prématurées.

Pour choisir la technique de refroidissement, huit facteurs doivent être pris en considération : la taille, le coût, l'efficacité thermique, le bruit, les vibrations, la maintenance, et les interférences électriques avec les composants de l'appareil électronique.

### **I.3.1. Refroidissement à air**

La technologie de refroidissement par air est l'une des plus communes et largement utilisée. On utilise l'air comme fluide caloporteur qui vient en contact avec des radiateurs sous forme pulsée (convection forcée) ou naturelle (convection naturelle). [24]

- **Convection naturelle par air**

Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur dimensionné suivant la surface de refroidissement. La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant.

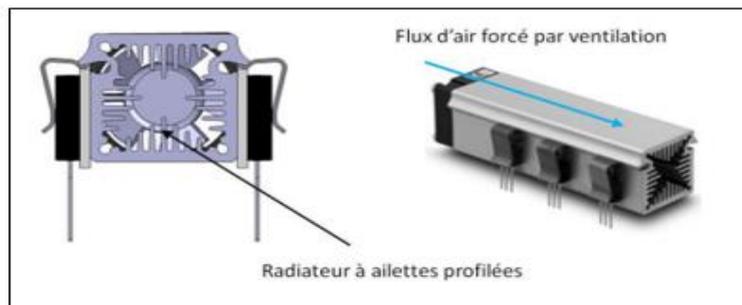
Ce dispositif est toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium). [24]



**Figure I.09** : Système de refroidissement à air passif. [24]

- **Convection forcée à air**

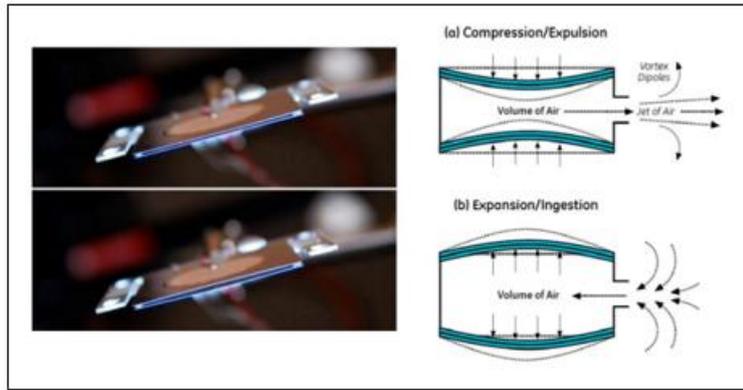
Le soufflage d'air forcé grâce à des ventilateurs est la méthode la plus utilisée en refroidissement de composants électroniques pour sa simplicité de mise en œuvre, de son coût et de sa stabilité. L'air est mis en mouvement par le biais de générateur d'écoulement comme le montre l'exemple de la figure ci-dessous. [25]



**Figure I.10** : Système de refroidissement par air. [25]

- **La pompe piézoélectrique**

La pompe à air piézoélectrique dit « dual piezo cooling jet » est un appareil micro-fluidique composé de deux disques de nickel connectés de chaque côté par un matériau piézoélectrique en céramique alimenté par un courant alternatif. Cet appareil est silencieux et ne requiert aucun moteur. Il est fin et consomme moins d'énergie que les ventilateurs conventionnels. [25]



**Figure I.11** : La pompe piézoélectrique et son principe de fonctionnement. [25]

### I.3.2. Refroidissement par liquide caloporteur

La valeur du coefficient d'échange convectif  $h$  est limitée dans le cas de l'air à cause de sa faible conductivité thermique. Cependant, l'air peut être remplacé par un autre fluide afin d'augmenter la valeur de  $h$  et donc la puissance évacuée. Dans de nombreux cas, le fluide utilisé est l'eau. Ceci est dû à sa très bonne capacité calorifique, sa conductivité thermique et à sa simplicité d'utilisation. Dans d'autres cas, on peut aussi avoir recours à des fluides diélectriques comme les fluorinert, le midel, le R12. [26]



**Figure I.12** : Exemple d'un refroidissement régulier à liquide configuré pour un ordinateur.

[27]

- **Refroidissement par plaque à eau**

Le refroidissement liquide est implémenté dans les composants électroniques sous la forme d'une plaque à eau dans laquelle circule un liquide caloporteur ou de canalisation fluidique 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. [28]

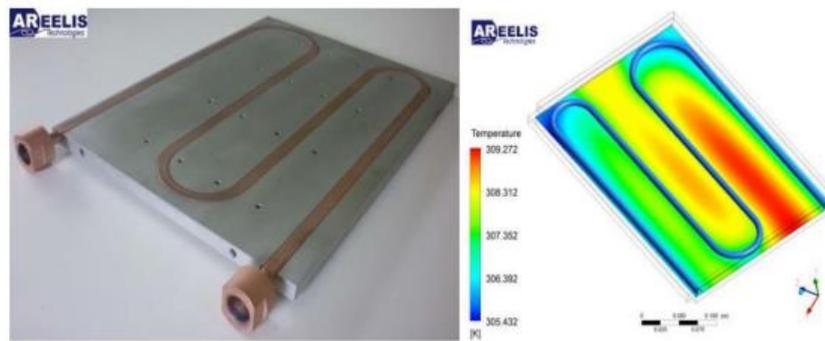


Figure I.13: Refroidissement liquide à plaque froide. [28]

- **Refroidissement par canaux**

Le refroidissement par mini et micro-canaux constitue un moyen très intéressant pour la gestion thermique de l'électronique de puissance. En effet, des densités de flux de chaleur de plusieurs centaines de  $\text{w/cm}^2$  peuvent être évacuées grâce à cette technique. Les mini et micro-canaux peuvent être de forme plus ou moins élaborée suivant l'effet recherché et la technologie de fabrication utilisée. La forme la plus simple est constituée par des canaux rectangulaires axiaux en parallèle. [29]

Les principaux avantages de cette technique sont : [24]

- Les micro-canaux agissent comme plusieurs micro-plaque-ailettes. Ils augmentent la surface d'échange. la résistance thermique de convection est donc réduite.
- Pour utiliser les micro-canaux, la semelle est supprimée, donc la résistance thermique de conduction est réduite.
- En faisant appel à la technologie des micro-canaux on peut réduire la taille de système de refroidissement.

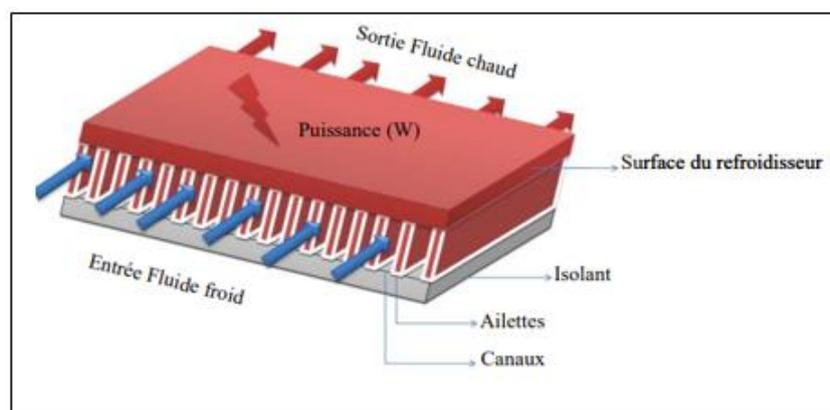


Figure I.14 : Refroidissement par convection dans des canaux. [29]

### I.3.3. Refroidissement par jets

Le refroidissement par jets est une solution favorisée dans les applications industrielles lorsque l'on cherche à enlever, ou bien à apporter une quantité de chaleur intense sur des surfaces. Cette technique est largement utilisée dans le domaine aéronautique pour refroidir les aubes de turbines ou les chambres de combustion des moteurs de nouvelles générations. [30]

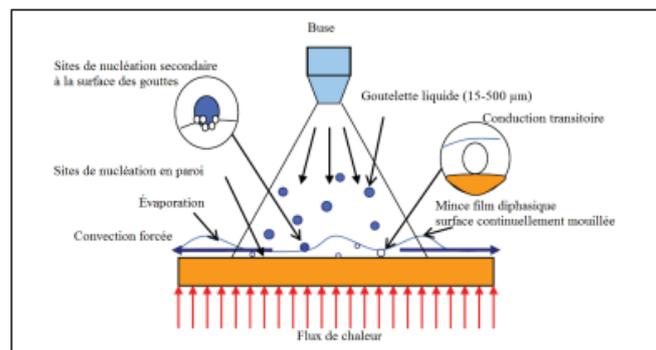
Dans le domaine de l'électronique, l'augmentation perpétuelle de la puissance dissipée par les composants modernes et le souci permanent de compacité ont conduit au besoin de trouver des solutions efficaces au problème de l'extraction de chaleur en milieu confiné. Cette fonction est souvent assurée par des échangeurs compacts dont les parois sont refroidies par des jets impactant. [30]

### I.3.4. Refroidissement par spray

La technologie de refroidissement par spray est largement utilisée dans le refroidissement en électronique et électronique de puissance, vue son efficacité à dissiper de grands flux de chaleur sur des petites surfaces. Elle consiste à pulvériser un liquide (de l'eau déionisée ou des fluides frigorigènes comme le PF-5060 et R134a) sur la surface chaude à refroidir. La pulvérisation peut être réalisée par la mise sous pression du liquide ou à l'aide d'air comprimé. [31]

Trois modes de transfert de chaleur sont impliqués dans le refroidissement par spray :

- Le transfert de chaleur entre les gouttes et la surface chaude
- Le transfert de chaleur par convection entre les gouttes et la phase gazeuse (réfrigérant et éventuellement de l'air) à l'intérieur de la chambre de pulvérisation.
- Le transfert par rayonnement de la paroi (négligeable, car il ne représente que 1,5 % de la chaleur totale dissipée). [31]



**Figure I.15 :** Mécanismes de transfert de chaleur en refroidissement par pulvérisation. [31]

### I.3.5. Refroidissement par caloducs

Un caloduc est un système de refroidissement diphasique qui, en profitant du changement de phase d'un fluide caloporteur, prélève de la chaleur en un point et la transporte vers un autre sans utiliser de pompe ou autre artifice mécanique. Il est constitué d'une enceinte fermée dont les parois internes sont recouvertes par un réseau capillaire saturé de liquide. Il est généralement composé de trois parties appelées évaporateur, condenseur et zone adiabatique et il est caractérisés par : une conductivité thermique très élevée, un fonctionnement quasi isotherme et un contrôle de la température. [32]

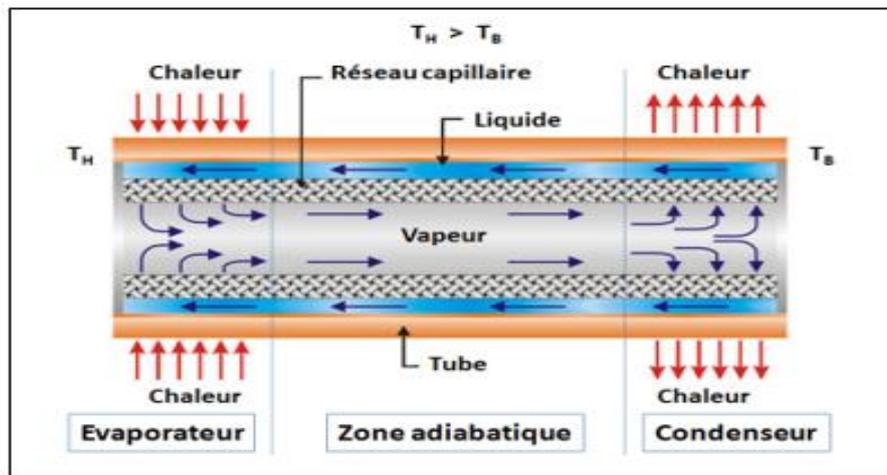


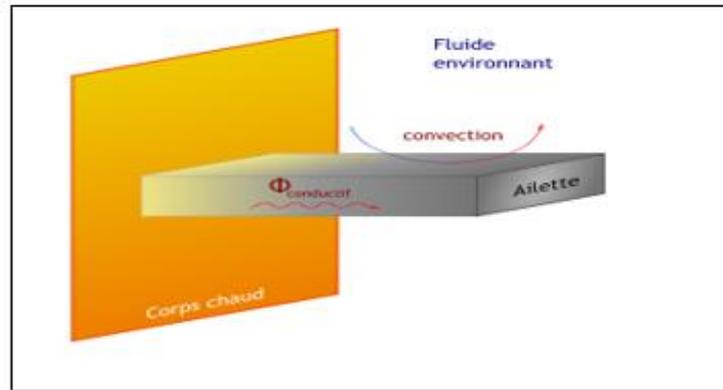
Figure I.16 : Schéma de caloduc classique. [24]

## I.4. Les dissipateurs de chaleur à ailettes

### I.4.1. Les ailettes

L'ailette est un dispositif thermique utilisé pour augmenter le taux de transfert de chaleur par convection. Son rôle est d'améliorer l'évacuation de la chaleur d'un système solide confiné dans lequel les densités de flux de chaleur sont élevées. [33]

Selon la formule de transfert de chaleur par convection, le taux de transfert de chaleur est directement proportionnel à la surface exposée au milieu convectif. Par conséquent, les ailettes aident à augmenter la surface exposée au milieu de circulation. Le transfert entre l'ailette et le mur se fait par conduction, alors que les échanges avec le fluide extérieur ont lieu par convection. [33]



**Figure I.17 :** Principe des ailettes. [34]

L'importance des ailettes, même si leur forme peut beaucoup varier, elles sont indispensables pour améliorer le rendement de tout échangeur de chaleur. Que le but soit de refroidir un élément en transmettant sa chaleur à l'air ambiant, ou au contraire de chauffer un fluide grâce à une résistance électrique, le principe des échangeurs reste toujours le même, et des ailettes y sont presque toujours associées. [35]

#### **I.4.1.1. Les différents types des ailettes**

Dans les domaines d'applications technologiques, on trouve plusieurs formes et configurations des ailettes : [36]

- **Les ailettes droites :** C'est la géométrie la plus simple qui a essentiellement pour objectif d'augmenter la surface d'échange. Les canaux élémentaires peuvent être rectangulaires ou triangulaires.
- **Les ailettes ondulées :** Elles permettent de compacifier un peu la géométrie par rapport à des ailettes droites. L'angle doit rester assez faible pour éviter les décollements qui créent des dégradations d'énergie sans améliorer les performances thermiques.
- **Les ailettes droites perforées :** Les perforations permettant au fluide de communiquer entre les canaux afin d'uniformiser les échanges et d'engendrer de l'agitation turbulente.
- **Les ailettes en épingles :** Les épingles permettent une augmentation de la surface d'échange et créent du mélange et de la turbulence. Ce dispositif est fréquemment utilisé pour le refroidissement de composants électroniques.
- **Les ailettes à pas décalé :** Ces ailettes offrent sensiblement la même surface d'échange que les ailettes droites mais leur disposition décalée permet de générer de la turbulence, et d'augmenter le nombre de zones de formation de la couche limite, ce qui est bénéfique aux échanges thermiques.

- **Les ailettes persiennes :** Ce sont des canaux qui disposent de volets à travers lesquels peut circuler le fluide. Une partie des volets est disposée dans un sens et un peu plus loin dans l'échangeur, l'inclinaison des volets est inversée. Dans ce cas aussi la surface d'échange est conservée (par rapport aux ailettes droites) et, de la turbulence et du mélange sont alors engendrés par les volets (des persiennes).

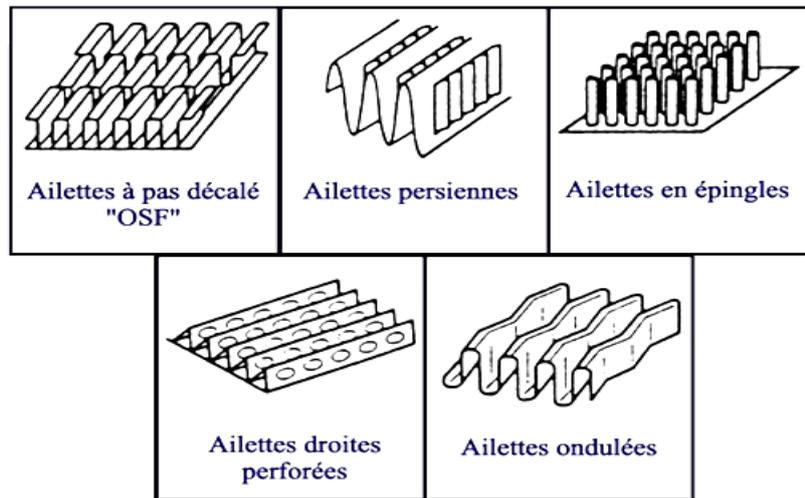


Figure I.18 : Différentes formes d'ailettes. [36]

#### I.4.1.2. Paramètres de performances des ailettes

Il existe deux mesures communes pour évaluer la performance des ailettes :

- **Efficacité d'une ailette**

Elle définit les performances d'une ailette en comparant le flux dissipé à celui qui serait dissipé dans une ailette de mêmes dimensions mais dont la température serait uniforme et égale à celle de la base. [37]

$$\epsilon = \frac{Q_{\text{ailette}}}{h \cdot A_t \cdot (T_s - T_\infty)} = \frac{\text{Taux de transfert de chaleur de l'ailette}}{\text{Taux de transfert de chaleur sans l'ailette}} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

**h :** Coefficient de convection ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ).

**A<sub>t</sub> :** Aire transversale de l'ailette (à la base) ( $\text{m}^2$ ).

**T<sub>s</sub> :** Température de surface (K).

**T<sub>∞</sub> :** Température du fluide (K).

- **Rendement d'une ailette**

Le rendement d'une ailette est défini comme étant le rapport entre le taux de transfert de chaleur réel de l'ailette et le taux de transfert thermique de l'ailette qui existerait si elle était toute à la température de la base. [38]

$$\eta = \frac{Q_{\text{ailette}}}{h \cdot A_{\text{tot}} \cdot (T_s - T_{\infty})} = \frac{\text{Taux de transfert de chaleur de l'ailette}}{\text{Taux de transfert de chaleur maximale l'ailette}} \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$A_{\text{tot}}$  : Aire totale de la surface de l'ailette ( $\text{m}^2$ ).

### I.4.1.3. Choix des ailettes

Les ailettes sont utilisées lorsqu'il faut extraire une densité de flux importante dans un encombrement réduit. Elles sont peu utiles pour les liquides car  $h$  est grand et utile dans le cas des gaz car  $h$  est faible. [37]

Des ailettes étroites et rapprochées sont meilleures que des ailettes plus grandes et espacées mais on est limité par les pertes de charges (elles augmentent si l'on diminue trop l'écartement des ailettes). L'ailette est d'autant plus performante que sa conductivité thermique  $\lambda$  est élevée. [37]

Le choix d'une forme géométrique convenable d'une ailette exige donc un compromis aussi bien entre le prix, le poids, l'espace disponible et la chute de pression qu'entre les propriétés du transfert de la chaleur des surfaces étendues. [38]

### I.4.2. Les dissipateurs de chaleur

Un dissipateur thermique est un dispositif qui transfère la chaleur produite par un composant mécanique ou électrique au milieu environnant, tel que l'air ou un liquide de refroidissement. En d'autres termes, il empêche le composant de surchauffer en absorbant sa chaleur et en la dissipant dans l'air. Il accomplit cette tâche en maximisant la surface en contact avec le milieu de refroidissement qui l'entoure. Ce milieu est souvent de l'air, mais il peut aussi s'agir d'un réfrigérant, d'eau ou d'huile. [7]

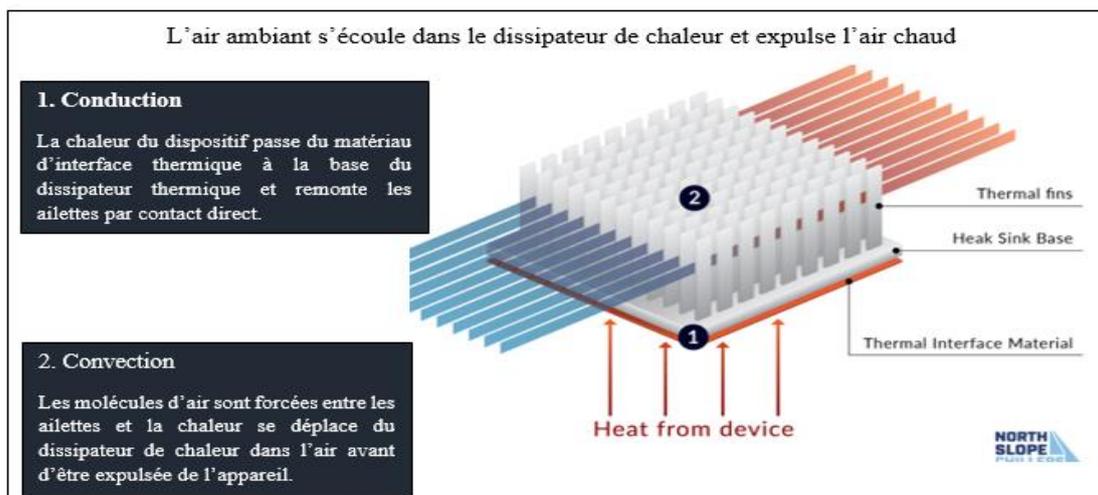
Les dissipateurs thermiques sont utilisés avec des dispositifs à semi-conducteurs haute puissance tels que des transistors de puissance et l'optoélectronique comme les lasers et les

diodes électroluminescentes (LED), où la capacité de dissipation thermique du composant lui-même est insuffisante pour modérer sa température. [39]

#### I.4.2.1. Le principe de fonctionnement des dissipateurs de chaleur

L'alimentation sur n'importe quel appareil électronique n'est pas toujours complètement efficace. Dans de telles situations, il y a une chance de production de chaleur supplémentaire sur le composant qui peut causer des problèmes avec le travail. Les dissipateurs de chaleur sont utilisés dans de tels cas. [40]

Les dissipateurs de chaleur fonctionnent selon le principe physique de base selon lequel la quantité de chaleur transférée d'une région chaude à une région froide est proportionnelle à la surface disponible pour la conduction de la chaleur. Ils sont utilisés pour éloigner la chaleur d'un composant électronique critique afin qu'il fonctionne toujours dans sa plage de température de fonctionnement nominale, la zone d'exploitation sécuritaire (SOA). La chaleur conduite est ensuite retirée du dissipateur thermique par convection d'air naturel ou forcé. [41]



**Figure I.19** : Principe de fonctionnement d'un dissipateur de chaleur. [42]

La conception la plus courante d'un dissipateur thermique est un dispositif métallique avec de nombreuses ailettes. La conductivité thermique élevée du métal combinée à sa grande surface en raison des ailettes entraîne le transfert rapide de l'énergie thermique à l'air environnant, plus frais. Cela refroidit le dissipateur de chaleur et tout ce qu'il est en contact thermique direct avec. L'utilisation de fluides et de matériaux d'interface thermique assure un bon transfert de l'énergie thermique vers le dissipateur de chaleur. De même, un ventilateur peut améliorer le transfert d'énergie thermique du dissipateur de chaleur à l'air en déplaçant l'air plus frais entre les ailettes. [40]

### I.4.2.2. Classification des dissipateurs de chaleur

Les dissipateurs thermiques peuvent être classés en fonction de plusieurs paramètres :

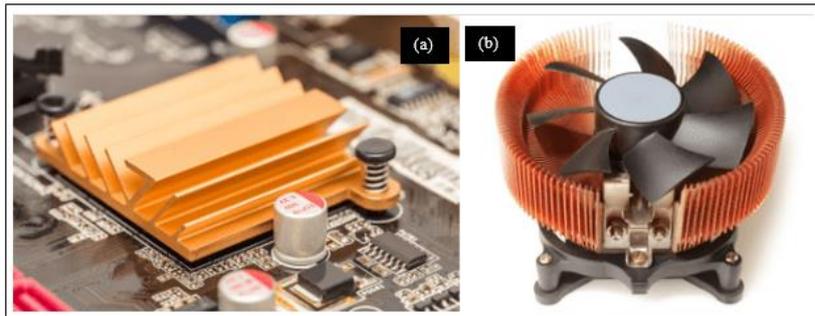
#### I.4.2.2.1 Classés par flux d'air

- **Les dissipateurs de chaleur passifs**

Ces dissipateurs thermiques dissipent l'énergie thermique par le processus de convection naturelle. Cela signifie que la flottabilité de l'air chaud provoque à elle seule le flux d'air produit à travers le système de dissipateur thermique (sans alimentation secondaire). La chaleur est répartie sur une grande surface, puis rayonnée à partir de minces brins appelés ailettes. [43]

- **Les dissipateurs thermiques actifs**

Ces dissipateurs thermiques utilisent la convection forcée pour augmenter le débit du fluide dans la région chaude. Cette convection forcée est généralement assurée par une soufflante ou un ventilateur, qui fait circuler l'air, détournant la chaleur des composants. [43]



**Figure I.20** : Dissipateur de chaleur passif (a) et actif (b). [44]

- **Les dissipateurs de chaleur hybrides**

C'est un dissipateur thermique à ailettes avec la pointe immergée dans un matériau à changement de phase (MCP). La zone exposée des ailettes dissipe la chaleur pendant les périodes où un refroidissement convectif élevé est disponible. Lorsque le refroidissement par air est réduit, la chaleur est absorbée par le MCP. [45]

#### I.4.2.2.2. Classés par processus de fabrication

- Les dissipateurs thermiques extrudés.
- Les dissipateurs thermiques biseautés.
- Les dissipateurs thermiques forgés.
- Les dissipateurs thermiques collés.

- Les dissipateurs thermiques estampés.
- Les dissipateurs de chaleur pliés.
- Les dissipateurs de chaleur usinés CNC.

**Tableau I.1** : Classification des dissipateurs thermiques par processus de fabrication. [46]

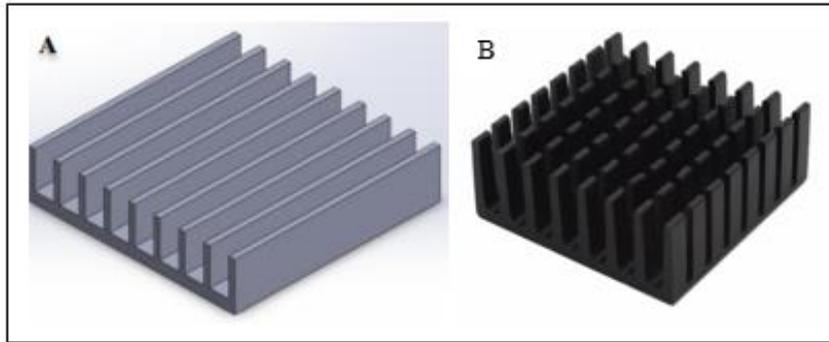
Type du dissipateur	Description	Avantages et performance	Inconvénients	Image
<b>Extrudés</b>	Utile dans la plupart des situations ; facile à automatiser la production une fois la conception est terminée.	-Appliqués pour la plupart des demandes. -Ses performances peuvent variées de faibles à élevées. -Ils sont peu couteux.	-Dimensions limitées par la largeur maximale d'extrusion.	
<b>Estampés</b>	Estampé à partir d'une seule pièce de métal, facile à automatiser la production.	-Utilisés pour les applications de faible puissance. -Faibles performances -Un très faible coût.	-Mauvaises performances et un faible niveau de rendement.	
<b>A ailettes collées</b>	Produit en collant des ailettes individuelles à une base ; relativement difficile à fabriquer.	-Disponibles et utilisés pour les applications nécessitant des dissipateurs de grande taille.	-Coûteux	
<b>A ailettes pliées</b>	Fabriqué en pliant des feuilles d'aluminium ou de cuivre dans une variété de formes d'ailettes qui sont souvent collées à une base séparée.	-Appliqués pour l'air canalisé. -Très hautes performances et une densité de flux élevée.	-Besoin coûteux de conduits.	
<b>Forgés</b>	Fabriqué par compression d'aluminium ou de cuivre et ils peuvent être forgés à froid ou à chaud.	-Utilisés dans de nombreuses applications. -Performances moyennes. -Peu Coûteux.	-Limités dans la conception et la gestion des flux.	
<b>Biseautés</b>	Les ailettes sont coupées (parées) à partir d'un seul bloc de métal (généralement du cuivre).	-Offrent une grande flexibilité de conception et une haute densité d'ailettes.	-Base épaisse et poids élevé.	

### I.4.2.3. Types des dissipateurs de chaleur

#### I.4.2.3.1. Dissipateurs thermiques à ailettes à plaques

Le dissipateur thermique à ailettes à plaques extrait la chaleur par convection et utilise des ailettes droites qui s'étendent sur toute la longueur pour maximiser la surface du dissipateur thermique. Les grandes ailettes créent une diffusion de la chaleur afin que plus d'énergie puisse être évacuée à la même différence de température. [47]

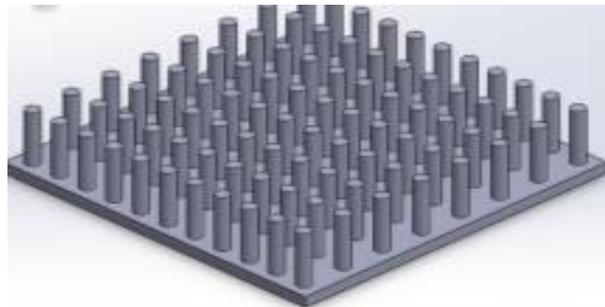
Les modèles les plus utilisés dans les applications industrielles sont ceux basés sur des dissipateurs à ailettes à plaques rectangulaires, en raison de leur structure simple et de leur facilité de fabrication. [47]



**Figure I.21** : Dissipateurs thermiques à ailettes à plaques (A) et à plaques rectangulaire (B). [48]

#### I.4.2.3.2 Dissipateurs thermiques à ailettes épinglées

Les dissipateurs de chaleur épinglés peuvent être une solution de rechange efficace aux dissipateurs thermiques à ailettes à plaques puisqu'ils ont l'avantage d'entraver le développement de la couche limite thermique sur des surfaces lisses qui est responsable de la limitation des taux de transfert de chaleur dans les conceptions des ailettes à plaques. [48]



**Figure I.22** : Dissipateur thermiques à ailettes épinglées. [48]

La principale différence entre les dissipateurs à ailettes à plaques et les dissipateurs épinglés est que la chute de pression et le taux de transfert de chaleur des dissipateurs épinglés sont plus élevés que ceux des dissipateurs à ailettes à plaques. De plus, la résistance thermique et la température moyenne des dissipateurs à ailettes épinglés sont plus faibles que celles des ailettes plates. [48]

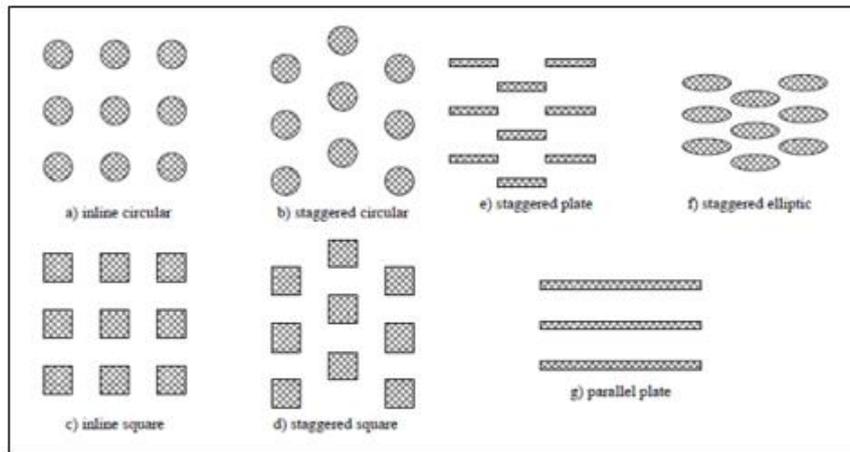


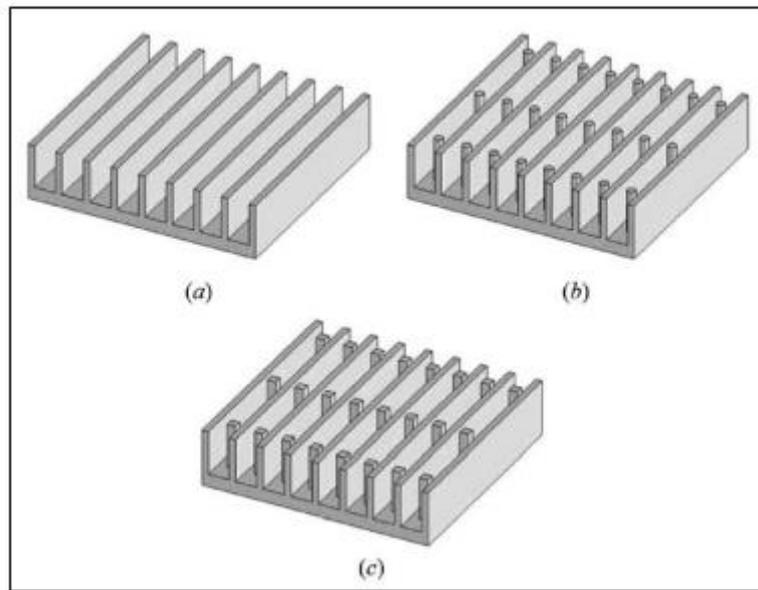
Figure I.23 : Différents types de dissipateurs thermiques à ailettes épinglées. [48]

Tableau I.2 : Comparaison entre les dissipateurs thermiques à plaques et épinglées. [48]

Dissipateur thermique à ailettes à plaques	Dissipateur thermique à ailettes épinglées
Les plus utilisés dans les applications industrielles	
Air, eau et nano-fluides sont utilisés pour refroidir différents dispositifs d'ingénierie	
Structure simple et facilité de fabrication	Structure et fabrication relativement complexes
Ailettes à plaques parallèles seulement	Différents types de configurations : circulaire, carrée, elliptique, bande en ligne et tableaux décalés
La limitation intrinsèque selon laquelle l'air circule dans des canaux parallèles de dissipation thermique qui sont lisses	Agir comme promoteurs de turbulence pour briser une couche limite
Développement facile d'une couche limite	Entrave au développement d'une couche limite
Limiter le taux de transfert de chaleur réalisable	Améliorer les taux de transfert de chaleur
Baisse de pression et puissance du ventilateur	Augmentation de la chute de pression et de la puissance du ventilateur
Augmentation de la température moyenne de base	Abaisser la température moyenne de base
Résistance thermique plus élevée dans une certaine mesure	Baisse de la résistance thermique dans une certaine mesure

### I.4.2.3.3. Les dissipateurs de chaleur compacts

Les dissipateurs de chaleur compacts se composent de quelques broches entre des ailettes à plaques alignés et décalés dans les arrangements. Comme il y a plus de goupilles dans les ailettes, la croissance de la couche limite dans le dissipateur thermique est inhibée parce que les goupilles agissent comme des obstructions. [48]

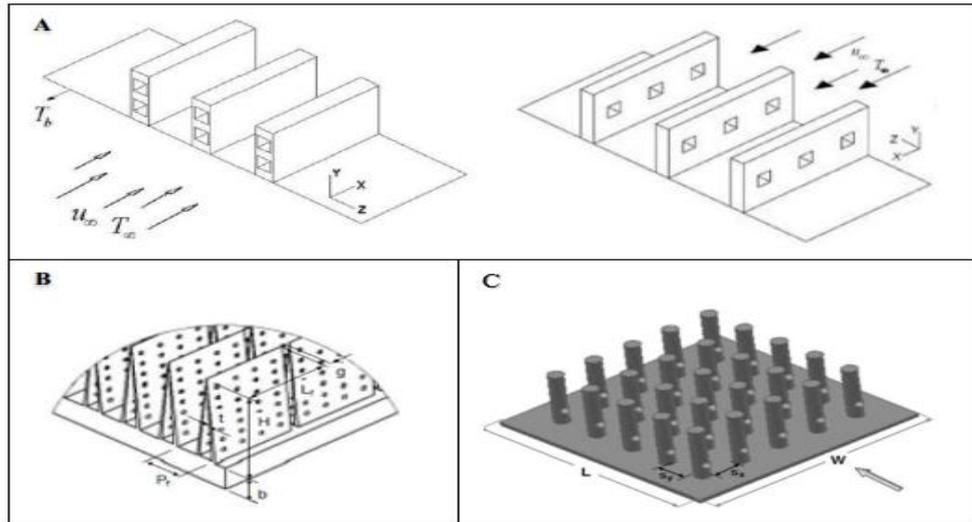


**Figure I.24 :** Dissipateurs de chaleur compacts : (a) à ailettes à plaques, (b) à goupille circulaire, et (c) à plaques carrés. [48]

Les avantages des dissipateurs de chaleur compacts sont la réduction de la température du composant et de la résistance thermique et l'amélioration du nombre de Nusselt, par rapport aux dissipateurs à ailettes à plaques et broches. Cependant, ces broches entraveront le flux d'air, ce qui conduit à une chute de pression. Ainsi, ce type de dissipateur se caractérise par une énorme puissance de ventilateur par rapport aux autres types. [48]

### I.4.2.3.4. Les dissipateurs de chaleur à ailettes perforées

Les ailettes de convection forcée ont diverses applications, du refroidissement de minuscules composants électroniques au refroidissement des éléments combustibles dans les réacteurs nucléaires. En outre, les perforations des ailettes jouent un rôle important en améliorant les caractéristiques thermiques et d'écoulement des dissipateurs de chaleur et en faisant disparaître les tourbillons et les couches limites derrière les ailettes à plaques et les dissipateurs thermiques à goupille. De plus, les appareils munis de ces ailettes perforées sont plus légers et le matériel est également conservé dans leur conception. [48]



**Figure I.25** : Dissipateurs thermiques : (A) à ailettes à plaques perforées, (B) à ailettes pliées perforées et (C) à ailettes épinglées perforées. [48]

#### I.4.2.4. Les paramètres de conception des dissipateurs de chaleur

- **La résistance thermique**

L'efficacité d'un dissipateur thermique est souvent déterminée par le facteur de la résistance thermique. Les dissipateurs de chaleur sont principalement sélectionnés après le calcul de leur résistance thermique, ce qui donne une approximation de la quantité de chaleur qu'il sera en mesure de décoller à un moment donné. Les dissipateurs de chaleur de faible résistance thermique sont généralement préférés parce que cela montre que la chaleur peut être emportée en plus grandes quantités lorsque la résistance est moindre. [49]

- **Le matériau**

Les dissipateurs thermiques sont conçus à l'aide de matériaux à haute conductivité thermique tels que les alliages d'aluminium et le cuivre. Le cuivre offre une excellente conductivité thermique, une résistance antimicrobienne, une résistance à l'encrassement biologique, une résistance à la corrosion et une absorption de chaleur. Ses propriétés en font un excellent matériau pour les dissipateurs thermiques mais il est plus cher et plus dense que l'aluminium. [50]

- **Disposition, forme, taille et emplacement des ailettes du dissipateur thermique**

L'écoulement du fluide caloporteur est fortement impacté par la disposition des ailettes sur un dissipateur thermique. L'optimisation de la configuration aide à réduire la résistance à

l'écoulement du fluide, permettant ainsi à plus d'air de passer à travers un dissipateur thermique. Ses performances sont également déterminées par la forme et le design de ses ailettes. L'optimisation de la forme et de la taille des ailettes permet de maximiser la densité de transfert de chaleur. [50]

- **L'efficacité des ailettes**

Les ailettes font partie des dissipateurs de chaleur qui sont projetés à partir de la base et sont généralement des plaques plates. Les matériaux d'ailettes sont sélectionnés en fonction du facteur de conductivité. Une conductivité thermique élevée aide la chaleur à s'écouler facilement. L'utilisation d'un matériau qui a une conductivité thermique plus élevée et la diminution du rapport d'aspect des ailettes aident à augmenter l'efficacité globale des ailettes. [49]

## **I.5. Techniques d'amélioration du transfert de chaleur**

L'augmentation du transfert de chaleur est l'un des problèmes difficiles auxquels sont confrontés les ingénieurs du transfert de chaleur dans l'industrie. Les techniques d'amélioration sont largement utilisées dans de nombreuses applications dans le processus de chauffage pour permettre une réduction du poids et de la taille ou améliorer les performances des échangeurs de chaleur tel que les dissipateurs thermiques. Ces techniques sont classées comme techniques actives, passives et composées.

### **I.5.1. Techniques passives**

Ces techniques utilisent généralement des modifications de surface ou géométriques au canal d'écoulement en incorporant des inserts ou des dispositifs supplémentaires. Ils favorisent des coefficients de transfert de chaleur plus élevés en perturbant ou en modifiant le comportement d'écoulement existant (à l'exception des surfaces étendues), ce qui entraîne également une augmentation de la chute de pression. En cas de surfaces étendues, la surface de transfert de chaleur efficace sur le côté de la surface étendue est augmentée [51]. L'augmentation du transfert de chaleur par ces techniques peut être obtenue en utilisant :

- **Surfaces étendues (ailettes, bandes à persiennes)**

Le but de l'introduction de ces méthodes est de créer une turbulence tourbillonnaire et un écoulement secondaire [52]. Les ailettes lisses sont l'un des premiers types de surfaces étendues largement utilisées dans de nombreux échangeurs de chaleur. Les surfaces à ailettes sont

devenues très populaires en raison de leur capacité à perturber le champ d'écoulement en dehors de l'augmentation de la zone de transfert de chaleur. [51]

- **Inserts de bande torsadée**

Les inserts de bande torsadée sont l'une des méthodes d'amélioration les plus utilisées du transfert de chaleur. Les inserts de bande torsadée augmentent à la fois le transfert de chaleur convectif et le frottement de fluide dans la région d'écoulement. Ils induisent la turbulence et favorisent l'écoulement tourbillonnaire. De plus, les configurations géométriques des inserts de bande torsadée peuvent perturber la couche limite, ce qui permet d'obtenir un meilleur taux de transfert de chaleur. [53]

- **Inserts de fil enroulé (nervures transversales, hélicoïdales)**

Les inserts de fil enroulé, sont une méthode intéressante pour créer la rugosité de surface. Ils intensifient la perturbation de la couche limite laminaire et favorisent le réaménagement des couches limites thermiques et hydrodynamiques dans le flux de tube efficacement. De plus, le fil hélicoïdal peut être utilisé pour générer un flux secondaire qui aide à améliorer le taux de transfert de chaleur avec l'augmentation de la vorticité dans le flux tubulaire. [53]

- **Surfaces trait es**

Cette technique implique des piqûres, des cavités ou des rayures, comme des altérations dans les surfaces de la zone de transfert de chaleur qui peuvent être continues ou discontinues. Ils sont principalement utilis es pour l'ébullition et la condensation du fluide. [51]

- **Tubes enroul es**

Les tubes enroul es conviennent aux échangeurs de chaleur compacts. Ces méthodes produisent des flux secondaires qui soutiennent un coefficient de transfert de chaleur plus élevé [52]. Dans ces dispositifs, des écoulements secondaires ou des tourbillons sont g n r es en raison de la courbure des bobines qui favorise un coefficient de transfert de chaleur plus élevé dans les écoulements monophas es et dans la plupart des régions d'ébullition. [51]

### **I.5.2. Techniques actives**

Du point de vue de la conception et de l'application, ces techniques sont plus complexes, car la méthode nécessite une alimentation externe pour provoquer la modification du débit souhait e et l'amélioration du taux de transfert de chaleur. Son application est limit e en raison du besoin de puissance externe dans de nombreuses applications pratiques. En comparaison avec les techniques passives, ces techniques n'ont pas montré beaucoup de potentiel car il est difficile

de fournir une alimentation externe dans de nombreux cas [51]. Les diverses techniques actives sont les suivantes :

- **Aides mécaniques**

Ces dispositifs remuent le fluide par des moyens mécaniques ou en tournant la surface. Les exemples d'aides mécaniques comprennent les échangeurs à tubes rotatifs et les échangeurs de chaleur de surface et de masse. [52]

- **Vibrations superficielles**

Elles ont été utilisées principalement dans les écoulements monophasés. Une fréquence faible ou élevée est appliquée pour faciliter les vibrations de surface qui se traduisent par des coefficients de transfert de chaleur convectifs plus élevés. [52]

- **Vibrations liquides**

C'est le type le plus pratique d'amélioration des vibrations, compte tenu de la masse de la plupart des échangeurs de chaleur. La gamme de vibrations de pulsation d'environ 1Hzto ultrasons. Les fluides monophasés sont la principale préoccupation. Par exemple, écoulement monophasé, ébullition et condensation. [51]

- **Champs électrostatiques**

Le champ électrostatique comme les champs électriques ou magnétiques ou une combinaison des deux provenant de sources DC ou AC est appliqué dans les systèmes d'échangeurs de chaleur qui induit un plus grand mélange en vrac, convection de force ou pompage électromagnétique pour améliorer le transfert de chaleur. Cette technique est applicable dans le processus de transfert de chaleur impliquant des fluides diélectriques. [52]

- **Injection**

Cette technique est utilisée pour le transfert de chaleur monophasé. Il s'agit de fournir du gaz à un liquide qui coule à travers une surface de transfert de chaleur poreuse ou d'injecter un fluide similaire en amont de la section de transfert de chaleur. [51]

- **Aspiration**

Cette méthode est utilisée pour le transfert de chaleur en deux phases et le transfert de chaleur en une seule phase. L'ébullition nucléée en deux phases implique l'élimination de la vapeur à travers une surface chauffée poreuse, tandis qu'en écoulement monophasé, le fluide est aspiré à travers la surface chauffée poreuse. [52]

### **I.5.3. Techniques composées**

Une technique composée consiste à combiner plus d'une méthode d'amélioration du transfert de chaleur (active et/ou passive) pour augmenter la performance thermohydraulique des échangeurs de chaleur. Il peut être utilisé simultanément pour générer une augmentation qui favorise la performance du système soit des techniques fonctionnant indépendamment. [53]

## **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les trois modes de transfert de chaleur ; par convection, par conduction et par rayonnement. On a aussi détaillé les différentes méthodes de refroidissement des composants électroniques, en se basant sur le refroidissement par convection en utilisant le dissipateur de chaleur.

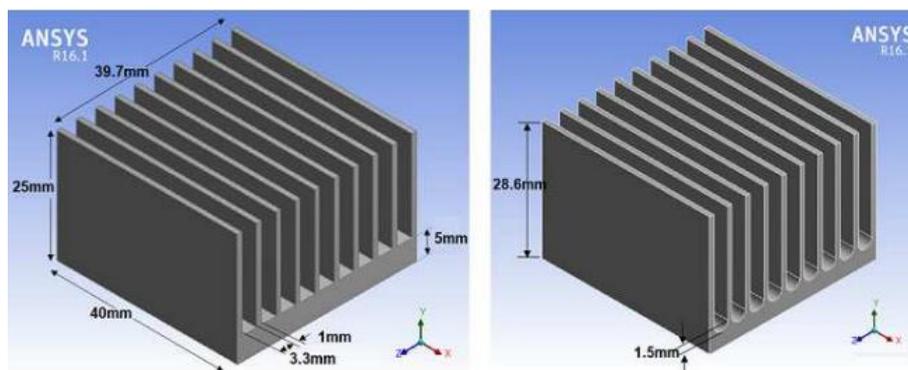
**Chapitre II :**  
**Revue bibliographique**  
**sur les dissipateurs de**  
**chaleur**

## II. Introduction

Les dissipateurs de chaleur sont utilisés dans les équipements industriels pour dissiper l'excès de chaleur de leurs pièces génératrices de chaleur à l'environnement. Au cours des dernières années, des efforts ont été consacrés à la fabrication d'appareils électroniques ou mécaniques moins lourds, moins encombrants et moins coûteux. La dissipation thermique du dissipateur de chaleur bloque un gros problème que de nombreux chercheurs tentent de résoudre. Ce chapitre présente donc, un résumé des efforts de recherche consacrés au développement de la performance thermique des dissipateurs de chaleur.

### II.1. Revue bibliographique

**Hussain et al. (2019)** ont étudié numériquement l'effet du profil du congé et de la direction de l'écoulement sur les performances thermiques du dissipateur thermique sous convection forcée. Deux configurations de dissipateurs thermiques ont été conçues, la première était avec un profil de congé et soumise à un écoulement parallèle, tandis que l'autre était sans congé et soumise à un écoulement incident. Le rayon de l'ailette de congé est de 1,5 mm et les dimensions de la base du dissipateur thermique étaient les mêmes dans les deux cas ( $40 \times 39,7 \times 1,5$  mm). Les résultats ont montré que le dissipateur thermique avec un profil d'ailettes en filet avait une température de base  $\theta$  et une résistance thermique respectivement inférieures de 7,5 % et 18 % à celles sans filet. [54]



**Figure II.01** : Le modèle géométrique (a) profil sans congé (b) profil de congé. [54]

**Yoon et al. (2018)** ont testé et analysé l'efficacité thermique radiative, en fonction de la position de la zone chaude partielle. Des simulations de modélisation numérique pour la convection forcée ont été utilisées pour analyser le transfert de chaleur entre le dissipateur thermique et l'air environnant. La position de chauffage partielle optimale a été discutée sous l'angle des effets du taux de transfert total de chaleur, de la vitesse de l'air, du rapport entre la longueur

totale du dissipateur thermique et la largeur de surface partiellement chauffée, de la conductivité thermique du dissipateur thermique et de l'épaisseur de sa base. Sur la base de cette analyse, une corrélation a été suggérée pour déterminer la position de chauffage partiel qui maximise la performance thermique en utilisant la méthode de conception expérimentale. Il a donc été possible de réduire la résistance thermique du dissipateur thermique jusqu'à environ 30 % en trouvant la position de chauffage partielle optimale. [55]

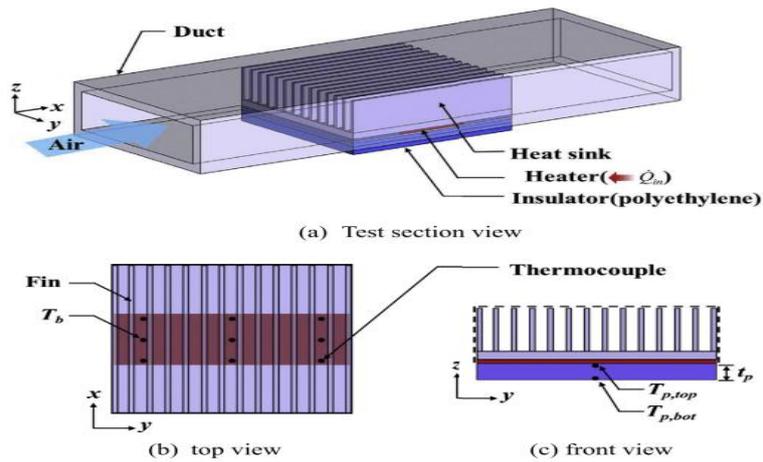


Figure II.02 : La surface du test. [55]

Effendi et al. (2018) ont prédit la correction du nombre de Nusselt pour un dissipateur thermique à ailettes hybrides creuses rondes (HHFHS) sous convection naturelle. Le logiciel CFD a été utilisé pour générer un modèle thermique 3D. 108 cas ont été étudiés, qui comprennent 36 arrangements avec une température de base différente. Les résultats numériques ont été validés expérimentalement. La corrélation du nombre de Nusselt développée, basée sur la hauteur de l'ailette, le nombre de Raleigh, l'épaisseur de la paroi de l'ailette et le diamètre externe de l'ailette, s'est avérée avoir une précision raisonnable avec moins de 20 % de différence par rapport à la corrélation numérique compliquée. [56]

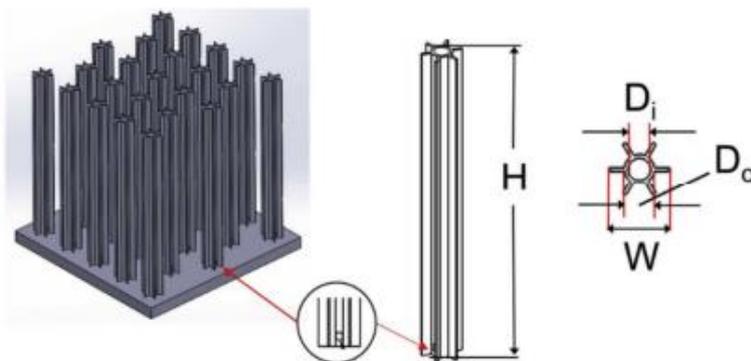
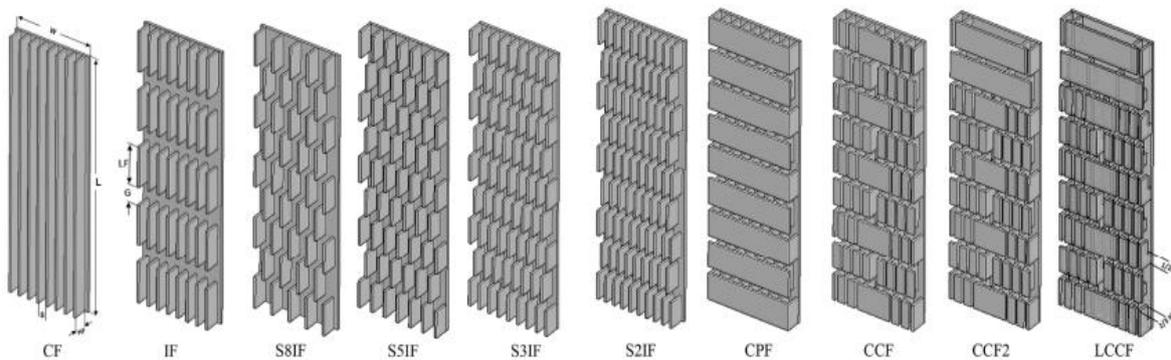


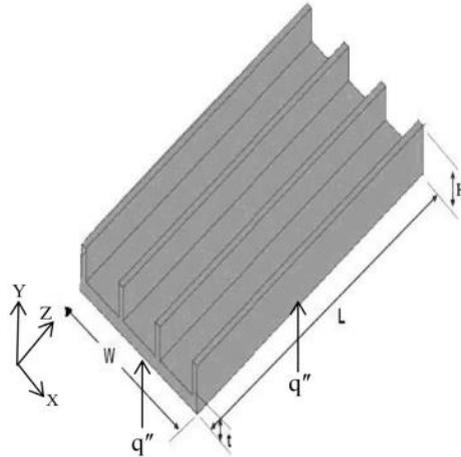
Figure II.03 : La structure et la conception du dissipateur thermique. [56]

**Mousavi et al. (2018)** ont estimé numériquement les performances de transfert de chaleur pour 10 différentes configurations de dissipateurs à ailettes verticales sous convection naturelle. Une simulation 3D par le logiciel CFD fluent 6.3 a été réalisée. Le dissipateur thermique vertical à ailettes a une longueur de 305 mm et une largeur de 101mm. Les résultats ont montré que la diminution de l'espace entre les ailettes interrompues n'améliorait pas le processus de refroidissement. Les ailettes coiffées ont amélioré le taux de transfert de chaleur mais elles ont un poids plus élevé qu'une ailette continue. En revanche, les ailettes en forme de L et à capuchon coupé ont moins de poids avec des performances de transfert de chaleur plus élevées que les autres ailettes. [57]



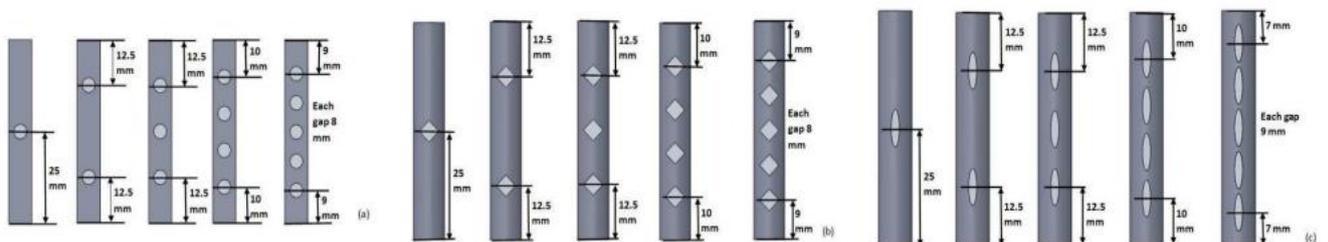
**Figure II.04 :** Configurations schématiques des dissipateurs thermiques. [57]

**Hasan et al. (2018)** ont examiné numériquement l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM) dans un dissipateur thermique micro-canaux (MCHS). L'air a été d'abord utilisé dans le dissipateur thermique, puis quatre matériaux de changement de phase (paraffine, neicosane, p116 et RT41) ont été utilisés comme moyens de refroidissement dans différents types et différentes configurations à différentes températures ambiantes. Les résultats ont montré que l'utilisation des PCM dans le dissipateur thermique permet de réduire sa température par rapport au cas sans utiliser de MCP, car ces matériaux ont la température de fusion appropriée à l'application et la chaleur latente de fusion. Ainsi, l'absorption de chaleur du PCM dépend de la température appliquée ; il est donc important de sélectionner un PCM avec une température de fusion appropriée correspondant à la température de certaines applications. Le coût des matériaux dépend de la classification du PCM (organique et inorganique) et de la quantité de MCP utilisés dans une certaine application. [58]



**Figure II.05 :** Le schéma du dissipateur thermique étudié. [58]

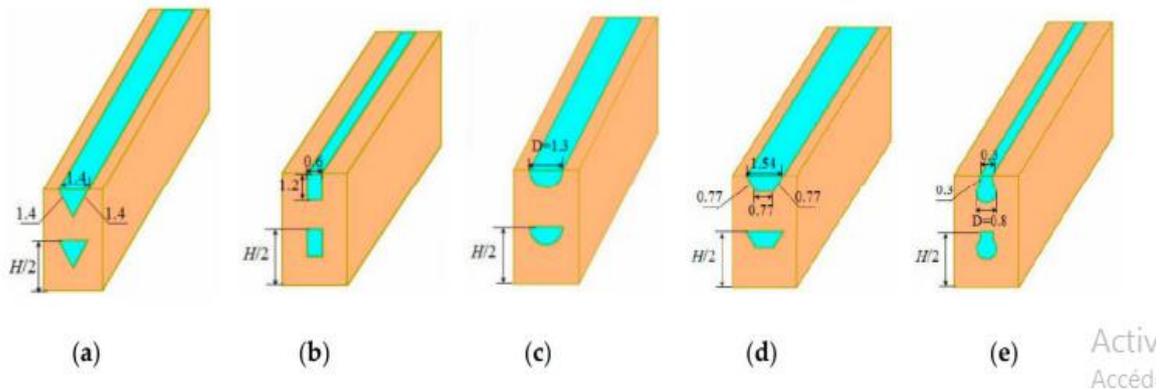
**Maji et al. (2017)** ont étudié numériquement le transfert de chaleur à travers une ailette à broche avec différents nombres, formes et tailles de perforation. Toutes les performances thermiques et la perte de charge de l'ailette perforée ont été comparées à l'ailette pleine correspondante dans les mêmes conditions. Le logiciel fluide ANSYS 14 a été utilisé pour concevoir les modèles de système. Un flux thermique de  $5903 \text{ w/m}^2$  a été appliqué au bas de la plaque, où les ailettes sont montées en ligne ou en quinconce. Les résultats ont montré que toutes les ailettes perforées avaient des performances thermiques plus élevées que les ailettes pleines, en particulier avec une disposition en quinconce. Le nombre (Nu) augmente et la chute de pression diminue à mesure que le nombre et la taille des perforations augmentent. Le taux de transfert de chaleur maximal obtenu en utilisant des ailettes elliptiques à perforation elliptique est supérieur de 40,5 % à celui de l'ailette circulaire pleine. [59]



**Figure II.06 :** Ailettes à perforations circulaires, losanges et elliptiques. [59]

**Deng et al. (2018)** ont étudié numériquement les performances hydrauliques et thermiques du dissipateur thermique à micro canaux à double couche (DL-MCHS) avec différentes géométries de section transversale. Cinq DL-MCHS ont été conçus avec des formes triangulaires, trapézoïdales, rectangulaires, circulaires et rentrantes comme on peut le voir sur la figure 7. La résistance thermique, la chute de pression et la distribution de la température de la paroi ont été

comparées pour toutes ces configurations et la monocouche (MCHS). Les résultats ont montré que le DL-MCHS diminue la température de la paroi avec une réduction de 27 % de la résistance thermique. Parmi les cinq géométries de DL-MCHS, la forme rectangulaire s'est avérée être le meilleur choix pour les meilleures performances thermiques, tandis que la forme rentrante nécessitait le moins de puissance de pompage. Tandis que la forme trapézoïdale présentait les pires chutes de pression, résistance thermique et puissance de pompage. [60]



**Figure II.07** : Schéma du DL-MCHS avec différentes formes de section transversale de micro-canal : (a) triangulaire ; (b) rectangulaire ; (c) circulaire ; (d) trapézoïdal ; (e) de forme rentrante. [60]

**Wan et al. (2017)** ont fabriqué quatre types d'ailettes à micro-broches décalées avec différentes formes de section transversale (carrées, circulaires, diamantées et lisses) par une méthode de micro-fraisage laser et construits pour les systèmes de refroidissement des dissipateurs de chaleur. La performance d'ébullition du débit des dissipateurs thermiques à ailettes à micro-broches (MPFHSs) a été caractérisée en utilisant de l'eau désionisée comme liquide de refroidissement. Ils ont examiné les effets de la forme de la section transversale sur les caractéristiques d'ébullition des MPFHSs. Les résultats des essais ont montré que les micro-ailettes carrées présentent le meilleur transfert de chaleur d'ébullition, suivies par des ailettes circulaires et rationalisées. Les micro-ailettes diamantées ont eu les pires résultats dans le transfert de chaleur bouillante et ont souffert de fortes instabilités d'écoulement biphasé à des flux de chaleur modérés à élevés, alors qu'elles ont introduit la plus petite chute de pression. Donc, les micro-ailettes carrées semblent être le choix optimal et devraient être choisies pour les systèmes de refroidissement des dissipateurs thermiques. [61]

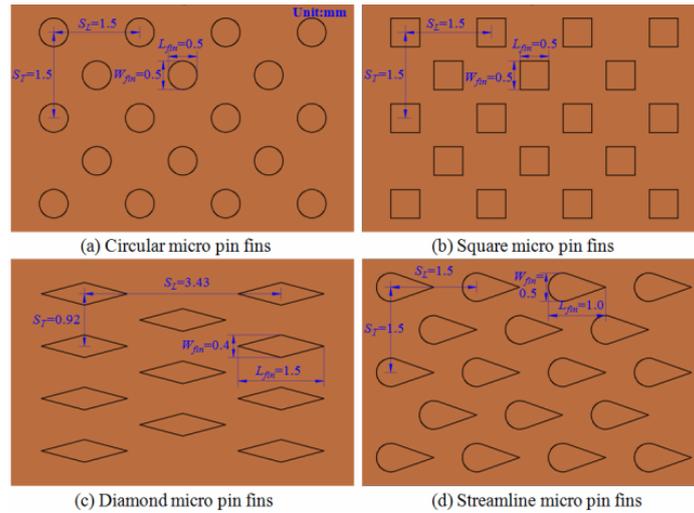


Figure II.08 : Dimensions géométriques des micro-ailettes à broches. [61]

Une simulation numérique en trois dimensions a été réalisée par **Ghani et al. (2017)** pour étudier les caractéristiques du flux de fluide et du transfert de chaleur dans le dissipateur thermique à micro-canaux avec cavités sinusoïdales et nervures rectangulaires MC-SCRR. Une analyse comparative a été effectuée sur la performance de la conception proposée avec des géométries connexes telles que le micro-channel à nervures rectangulaires MC-RR et le micro-channel à cavités sinusoïdales MC-SC. Les résultats ont montré que la performance thermique de MC-SCRR est supérieure à MC-RR et MC-SC. La nouvelle conception de MC-SCRR a prouvé la capacité de combiner entre deux caractéristiques importantes : une grande surface d'écoulement qui réduit considérablement la chute de pression et les perturbations de débit élevé causées par l'existence de nervures dans la partie centrale du canal. [62]

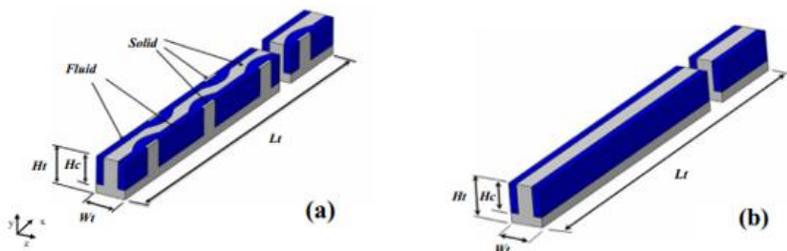
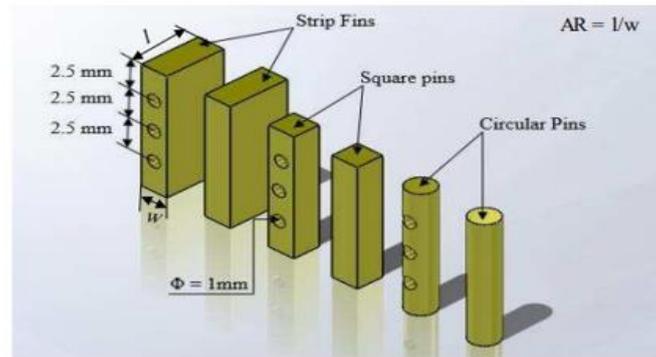


Figure II.09 : Schémas du (a) MC-SCRR et (b) MC-RC. [62]

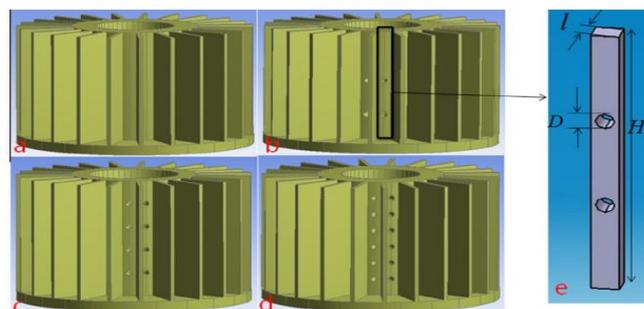
**Thompson et al. (2016)** ont exploré par calcul à l'aide d'un modèle de transfert de chaleur conjugué, les avantages de l'utilisation de dissipateurs thermiques à ailettes à bandes où le rapport d'aspect transversal des ailettes se situe entre ceux des ailettes à plaques (rapport d'aspect élevé) et des ailettes à broches. Les résultats ont montré que les ailettes à bandes

constituent un moyen efficace d'améliorer le transfert de chaleur, surtout lorsque des dispositifs décalés sont utilisés. La perforation des ailettes de bande apporte des améliorations supplémentaires en termes de transfert de chaleur, ainsi que de perte de pression et de masse du dissipateur thermique. Les résultats ont montré également que, pour des applications pratiques dans le refroidissement micro-électronique, les dissipateurs thermiques à ailettes à bandes perforées offrent des avantages importants en tant que moyen d'obtenir des températures de processeur plus faibles pour réduire la consommation d'énergie mécanique. [63]



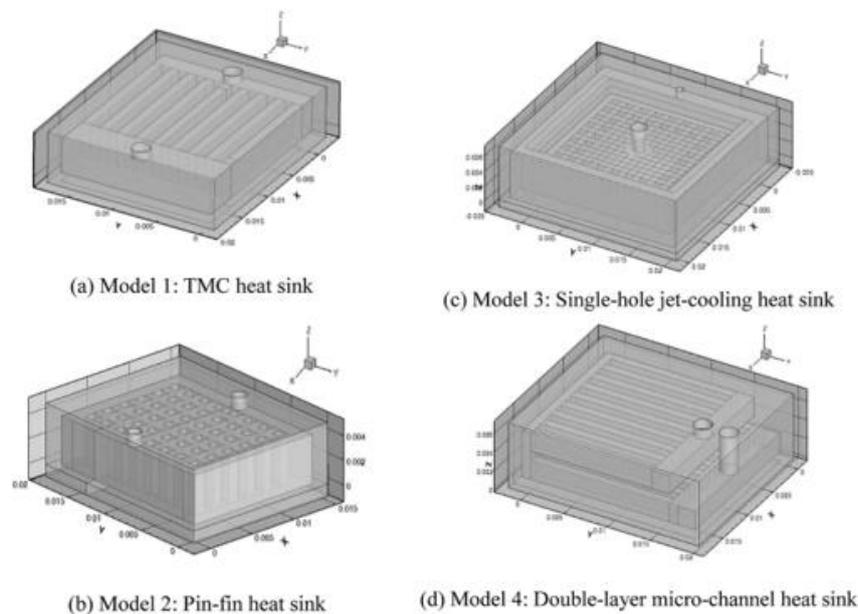
**Figure II.10 :** Les six modèles d'ailettes examinés. [63]

**Li et al. (2016)** ont réalisé des études numériques sur le transfert de chaleur par convection naturelle à partir de dissipateurs de chaleur radiaux avec anneau perforé. L'impact du nombre de perforations, du diamètre des trous, de la longueur des trous et de l'angle de direction sur l'efficacité thermique a été étudié. Les résultats ont révélé que les dissipateurs de chaleur radiaux ayant un anneau perforé ont subi les meilleures performances thermiques par rapport aux dissipateurs de chaleur ayant des anneaux imperforés. Dans le cas de la résistance thermique, le dissipateur thermique radial avec une masse réduite de 37% ayant optimisé l'anneau perforé avait montré une décroissance de 17% par rapport à celui de l'anneau imperforé. Ceci peut être attribué à l'écoulement convectif naturel libre à travers la perforation. [64]



**Figure II.11 :** Schéma des dissipateurs de chaleur radiaux avec anneau perforé. [64]

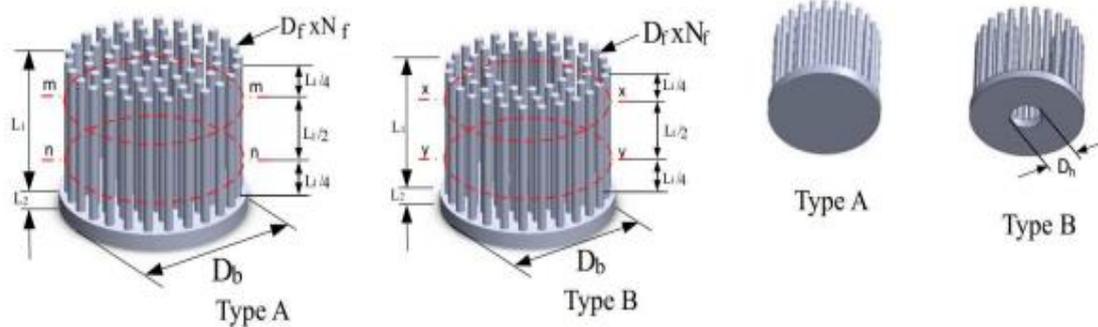
**Gong et al. (2015)** ont modélisé et étudié numériquement les caractéristiques du flux et du transfert de chaleur de quatre types de dissipateurs de chaleur, y compris le dissipateur thermique à micro-canaux traditionnels (TMC), à ailettes rectangulaires, à jet de refroidissement à simple trou et à micro-canaux à double couche afin d'améliorer les structures des dissipateurs de chaleur à micro-canaux pour les techniques de refroidissement des copeaux. Les résultats ont montré que la disposition du dissipateur thermique à micro-canaux est très importante pour le flux de fluide et le transfert de chaleur. En comparaison avec les rangées de micro-canaux traditionnelles, le système de micro-canaux à ailettes permet de renforcer les performances thermiques du dissipateur thermique global grâce à la meilleure coordination des champs. Bien que la technologie du dissipateur thermique de refroidissement par jet possède la meilleure capacité de refroidissement des copeaux, elle n'est pas proposée pour le domaine du refroidissement micro-canaux en raison d'une résistance à l'écoulement énorme. La structure à double couche avec l'entrée à la couche inférieure traite la deuxième meilleure capacité de refroidissement au coût d'une chute de pression importante acceptable. [65]



**Figure II.12** : Structure de quatre modèles de dissipateurs thermiques à micro-canaux. [65]

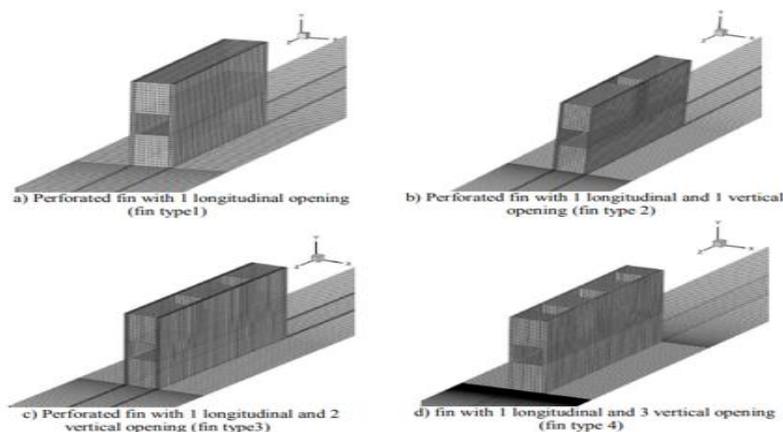
**Wen et Yeh (2015)** ont examiné expérimentalement et numériquement le taux de transfert de chaleur pour deux broches différentes de dissipateurs de chaleur à ailettes sous convection naturelle. Le premier était une base chauffante plate et solide, tandis que l'autre avait un trou dans sa base chauffante. L'influence de la plaque de base, de la hauteur des ailettes, du diamètre des trous dans la plaque de base et de la porosité du dissipateur thermique sur les performances

de transfert de chaleur a également été étudiée. Les résultats ont montré que le coefficient de transfert de chaleur pour le dissipateur thermique à base chauffée est plus élevé que celui du dissipateur non sacré en raison d'une accélération et d'une vitesse plus élevées dans la région de circulation. Ainsi, le dissipateur thermique creux a un coefficient de transfert de chaleur plus élevé que le dissipateur thermique solide lorsque sa porosité est  $\leq 0,262$ . [66]



**Figure II.13 :** Schéma d'une configuration d'un dissipateur épinglé. [66]

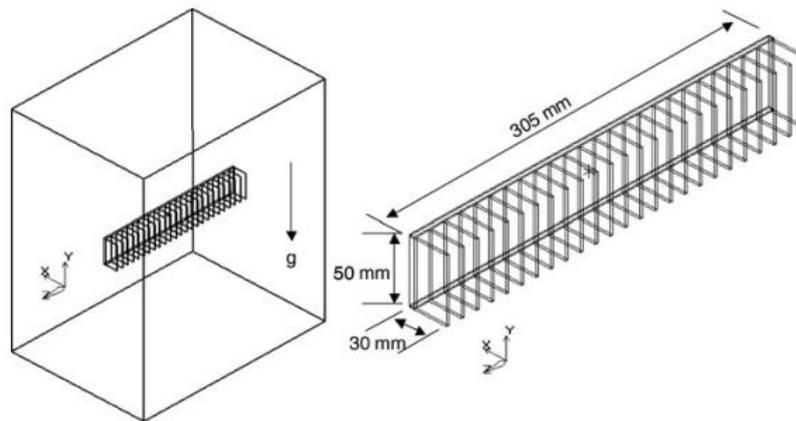
**Yaghoubi et al. (2013)** ont analysé le transfert de chaleur par convection d'un ensemble d'ailettes avec perforation croisées. À partir des résultats de la simulation numérique, les caractéristiques du champ d'écoulement et du transfert de chaleur de ces ailettes ont été illustrées et discutées. La validation a été effectuée en comparant le taux de transfert de chaleur avec les enquêtes précédentes. Il a été montré que l'augmentation des perforations transversales a réduit les zones de recirculation. Ainsi, parmi les différentes configurations de perforation, une ailette avec 1 perforation longitudinale et 3 perforations verticales a les performances de transfert de chaleur les plus élevées. [67]



**Figure II.14 :** Disposition en grille pour diverses ailettes perforées. [67]

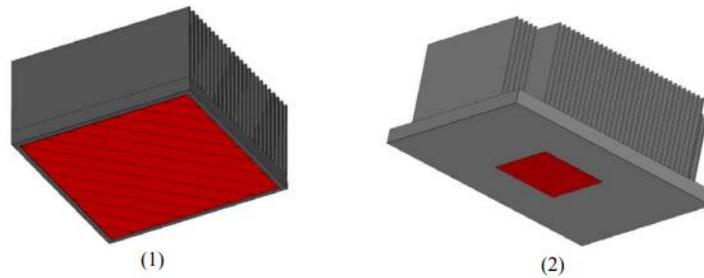
Une investigation computationnelle et expérimentale combinée a été effectuée par **Icoz et Arik (2010)** sur divers matériaux avancés de dissipateur thermique et prototypes fabriqués. Ils ont

comparé plusieurs matériaux légers pour un dissipateur de chaleur à convection naturelle à plaque verticale. Les matériaux considérés étaient l'aluminium, la mousse de carbone, le plastique avec un matériau de remplissage thermoconducteur et le graphite. Tous les dissipateurs de chaleur testés avaient une base de 50×305×3 mm et 25 ailettes de 2 mm d'épaisseur et de 30 mm de longueur. Les résultats ont été comparé avec le dissipateur thermique en aluminium utiliser traditionnellement et ont montré que le dissipateur de chaleur en mousse de carbone a quatre fois plus de mérite par rapport aux autres matériaux et que des économies de poids importantes peuvent être réalisées. [68]



**Figure II.15 :** Le modèle computationnel. [68]

**Chen et al. (2003)** ont évalué numériquement les dissipateurs de chaleur en composites graphite/époxy avec une conductivité thermique de 376 w/m.k dans le plan, une conductivité thermique de 7 w/m.k par le plan, et une densité de 1,9 g/cm<sup>3</sup>. L'effet de l'orientation de la faible conductivité par le plan sur le rendement du dissipateur thermique a été analysé en modélisant un grand dissipateur thermique sur une petite source de chaleur. Le meilleur cas était lorsque la direction de faible conductivité était alignée sur la longueur du dissipateur thermique. Cependant, le dissipateur thermique en graphite affichait toujours une température supérieure de 7,3 °C par rapport à un dissipateur thermique en cuivre identique sur le plan géométrique, ce qui a été attribué à la mauvaise propagation dans la base. Un dissipateur thermique hybride composé d'une base de cuivre et d'ailettes de graphite/époxy a été suggéré pour résoudre la mauvaise propagation dans la base, et les simulations ont montrées que cette conception se compare à un dissipateur thermique en cuivre. [69]



**Figure II.16 :** Représentation schématique du dissipateur thermique avec une source de chaleur occupée (1) base entière et (2) base partielle. [69]

**Moshfegh et Jonsson (2001)** ont effectué des essais dans une soufflerie avec sept types de dissipateurs de chaleur, y compris les dissipateurs de chaleur à ailettes à plaques, à bandes et à broches (épinglées). Dans le cas des dissipateurs thermiques à ailettes à bandes et à broches, des réseaux en ligne et décalés ont été étudiés. Les dissipateurs de chaleur à ailettes à broches avaient des sections circulaires et carrées. Une corrélation empirique pour prédire le nombre de Nusselt et la chute de pression le long de différents types a été mise au point. Les résultats ont montré qu'aux nombres élevés de Reynolds dans les conduits de dérivation zéro, la chute de pression est plus grande pour les dissipateurs de chaleur à ailettes à broches par rapport aux dissipateurs de chaleur à ailettes à bande tandis que la différence de résistance thermique est marginale. Par conséquent, il n'est pas avantageux d'utiliser des dissipateurs thermiques à ailettes à broches à haut nombre de Reynolds. [70]

## II.2. Optimisation des dissipateurs de chaleur

Afin d'améliorer les performances thermiques des dissipateurs de chaleur, des études d'optimisation ont été menées. Ces études reposaient sur des modèles analytiques ou des modèles numériques de dynamique des fluides couplés à des approches d'optimisation de la taille et de la forme. D'après **Ahmed et al. (2018)** [71], l'optimisation peut être réalisée par certaines méthodes, résumées comme suit :

### II.2.1. Optimisation des dissipateurs de chaleur avec ébullition

**Nascimento et al. (2013)** ont évalué expérimentalement un dissipateur thermique basé sur l'ébullition du R134a à l'intérieur de canaux à petite échelle. Le dissipateur de chaleur était composé de cinquante micro-canaux rectangulaires parallèles avec des dimensions transversales de 100  $\mu\text{m}$  de largeur et de 500  $\mu\text{m}$  de profondeur, et la longueur totale de 15 mm. Les résultats ont montré qu'en maintenant la qualité moyenne de la vapeur au-dessus de la

constante du dissipateur de chaleur, le coefficient moyen de transfert de chaleur augmentait lorsque la vitesse de masse augmentait. Les performances du dissipateur sont améliorées avec la diminution de la vitesse de masse et le sous-refroidissement du liquide à l'entrée des micro-canaux. [72]

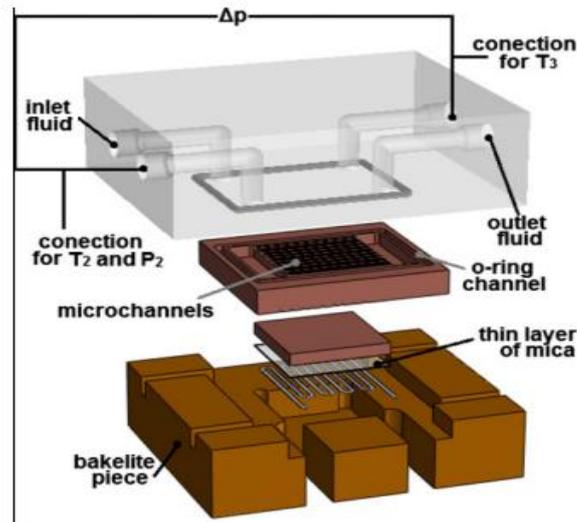


Figure II.17 : Vue de la section d'essai. [72]

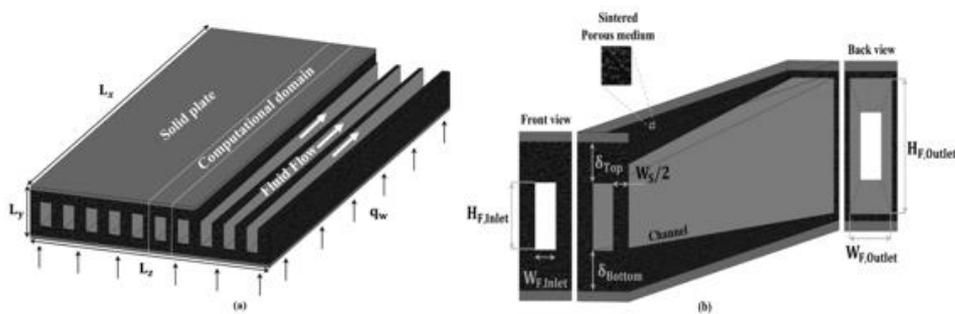
Les coefficients locaux de transfert de chaleur ont été mesurés par **Agostini et al. (2008)** pour le réfrigérant R236fa bouillant dans un dissipateur thermique à micro-canaux de silicium pour un large éventail de flux de chaleur, de vitesses de masse et de qualités de vapeur. Trois grandes tendances en matière de transfert de chaleur ont été soulignées. Il a été constaté pour la première fois que le coefficient de transfert de chaleur en fonction de la qualité de la vapeur atteint un maximum à des flux de chaleur très élevés, puis diminue avec l'augmentation du flux de chaleur. [73]

**Geisler et Bar-Cohen (2007)** ont développé et utilisé une approche d'analyse par éléments finis (FEA) pour évaluer et optimiser efficacement la performance d'ébullition des dissipateurs de chaleur longitudinaux à ailettes rectangulaires, y compris la dépendance explicite de l'espacement des ailettes sur les coefficients de transfert de chaleur d'ébullition et le flux thermique critique (CHF). Il a été démontré que les dissipateurs thermiques au silicium poli dissipent près de cinq fois la limite de CHF de la surface de base non alimentée et surpassent d'un facteur de 2 les dissipateurs thermiques comparables en aluminium. Pour des géométries optimales de dissipateurs thermiques, sur les plages de paramètres explorées, l'épaisseur de la nageoire est approximativement égale à l'espacement de la nageoire, et la relation entre

l'épaisseur optimale et l'espacement est démontrée comme étant assez insensible à la conductivité thermique de la nageoire. [74]

### II.3.2. Optimisation du dissipateur thermique par l'utilisation de milieux poreux

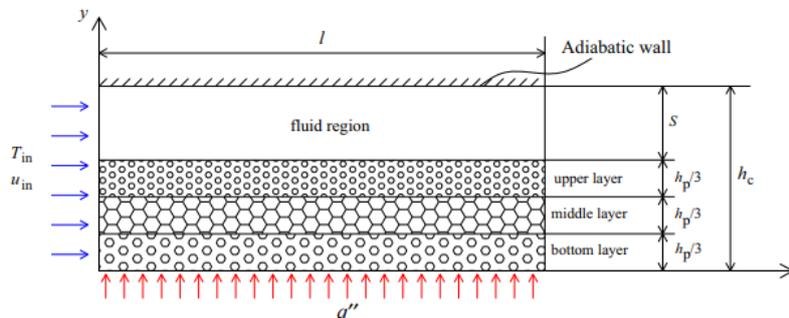
**Hajmohammadi et al. (2021)** ont analysé l'élargissement et la réduction de la section de passage du réfrigérant pour des dissipateurs thermiques à micro-canaux (MCHS) en utilisant des micro-canaux à section transversale variable remplis de milieux poreux pour améliorer leur performance thermique. Les performances des MCHS nouvellement conçus ont été comparées à celles des MCHS de référence. Les résultats ont indiqué que l'utilisation de matériaux poreux dans les MCHS convergents et divergents entraîne une amélioration significative du rendement total des MCHS. Bien que le matériau poreux affecte la performance thermique, il améliore la performance hydraulique. Le matériau poreux compense notamment les effets indésirables sur la performance thermique, et le matériau poreux améliore la performance totale. Le MPCHS avec passage constant du liquide de refroidissement améliore la performance du MCHS de référence jusqu'à 48 %, et le PMCHS optimal avec passage de liquide de refroidissement de différentes tailles améliore la performance totale du MCHS de référence jusqu'à 89 %. [75]



**Figure II.18 :** Illustration schématique du MCHS poreux proposé. [75]

Une étude numérique a été menée par **Arasteh et al. (2019)** pour analyser un canal partiellement rempli d'un milieu poreux à trois couches occupant 60 % d'un dissipateur thermique. A cet effet, deux modèles de configuration de milieux poreux ont été évalués : la mousse métallique avec (A) des diamètres de particules similaires et des porosités différentes et (B) des porosités similaires et des diamètres de particules différents. Les résultats ont montré que l'augmentation de la porosité et du diamètre des particules des couches de mousse métallique entraîne des gradients de température plus élevés et un transfert de chaleur plus important. Ainsi, la porosité et le diamètre des particules de la couche en contact avec la région du fluide ont le plus d'effet

sur le coefficient de frottement (plus le diamètre et la porosité des particules de cette couche sont élevés, moins le coefficient de frottement est élevé). [76]

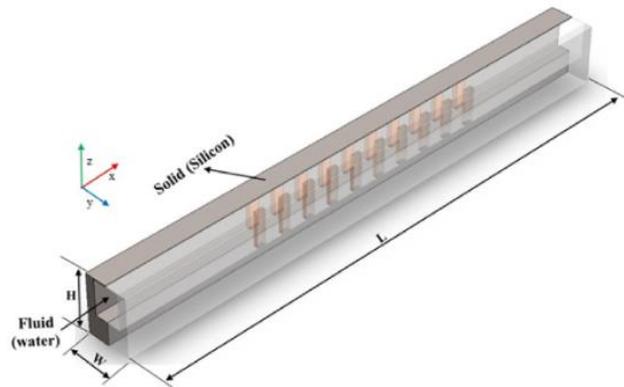


**Figure II.19** : Schéma du canal partiellement rempli de milieux poreux à trois couches. [76]

**Zhang et al. (2013)** ont effectué des expériences sur un dissipateur thermique à micro-canaux en utilisant des métaux poreux de type lotus (gasars) avec de longs pores cylindriques formés lors de la solidification unidirectionnelle du système eutectique métal-gaz. Les résultats expérimentaux ont montré que le dissipateur de chaleur en cuivre poreux de type lotus refroidi par eau a une excellente performance de transfert de chaleur et un coefficient de transfert de chaleur élevé a été atteint lorsque la porosité est de 29 %. Après avoir coupé le cuivre poreux le long de la direction verticale de l'axe des pores en 4 ou 8 sections égales alignées dans la direction de l'axe des pores, un coefficient de transfert de chaleur plus élevé a été obtenu (la réduction de la longueur du dissipateur de chaleur en cuivre poreux le long de l'axe des pores permet d'augmenter la porosité pénétrante et donc le débit, et d'améliorer la performance de transfert de chaleur du dissipateur de chaleur). [77]

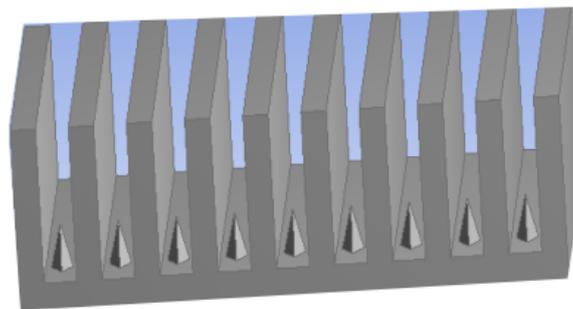
### II.2.3. Optimisation des dissipateurs thermiques par l'utilisation de turbulateurs

Les performances thermiques des dissipateurs de chaleur à micro-canaux avec différentes dispositions de turbulateurs ont été étudiées par **Khan et al. (2022)**. Dans les configurations de conception, cinq cas, ayant différents emplacements de turbulateurs sur la paroi du canal, ont été pris en compte et l'effet de trois largeurs de microcanaux différentes avec différents flux de chaleur du mur ont été évalués pour chaque cas. Il a été constaté que la disposition des turbulateurs influence le comportement thermique du fluide de travail dans le canal. Tel que, le boîtier, où les turbulateurs sont situés sur 75% de longueur de canal avec un pas de 0,75 mm, a démontré la performance thermique la plus élevée avec le nombre maximum de Nusselt au nombre de Reynolds 800. Cependant, l'emplacement du turbulateur près de la sortie du canal (cas 1 et 5) donne lieu à la performance thermique la plus faible. [78]



**Figure II.20** : Représentation schématique du microcanal avec turbulateurs décalés. [78]

La conception thermique de dissipateur thermique à ailettes à plaques (PFHS) a été optimisée par **Hamdi (2018)** en insérant des nervures entre les canaux dans différentes tailles, positions, nombres et orientations afin d'obtenir une conception thermique optimale de ce type de dissipateurs de chaleur. Les résultats ont montré que le dissipateur thermique à ailettes nervurées (RPFHS) a fourni un rendement thermique de 1,55 fois supérieur au (PFHS) dans les conditions correspondantes. Mais cette amélioration a diminué lorsque le nombre de côtes a augmenté. Pour la même performance thermique, la puissance de pompage de (RPFHS) a été réduite à 69,65% par rapport au cas de (PFHS). De plus, les (RPFHS) ayant cinq canaux avec 15 nervures ont montré une performance hydrothermique de 1,37 fois supérieure à celle des (PFHS) ayant neuf canaux, avec une réduction du matériau de substrat de 27,24 %. [79]



**Figure II.21** : Schéma du dissipateur de chaleur à ailettes nervurées. [79]

**Wang et al. (2011)** ont proposé une nouvelle structure d'ailettes de cannelure applicable aux dissipateurs thermiques refroidis à l'air dans des conditions d'écoulement croisé. Au total, huit dissipateurs de chaleur ont été fabriqués et mis à l'essai. Les résultats ont indiqué que la configuration proposée d'ailette de cannelure ainsi que la structure fossette/cavité ont amélioré le transfert de chaleur de 25 % avec une réduction du frottement de 20 %. Ils ont déclaré que

les ailerons interrompus offrent encore une bonne amélioration dans la région entièrement développée sans augmentation évidente de la pénalité de chute de pression. [80]

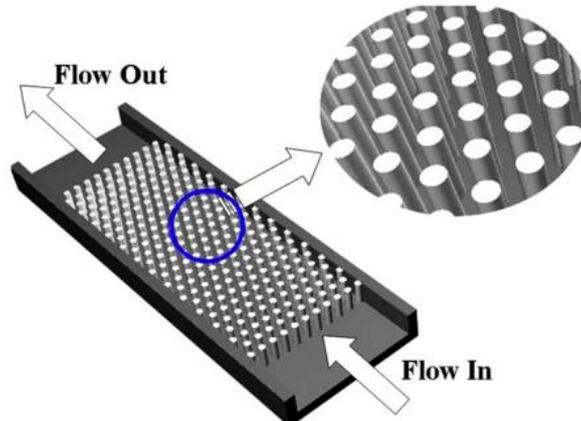
Une étude numérique a été réalisée par **Subbuswamy et Li (2009)** pour examiner le débit et le comportement de transfert de chaleur des dissipateurs thermiques à ailettes à plaques refroidis par un jet impactant et rehaussés par les nervures. La hauteur et la forme des turbulateurs ont été étudiées pour obtenir les meilleures performances. Le mécanisme de transfert de chaleur a été exploré pour le jet de turbulence confiné avec et sans turbulateurs. Les résultats ont montré qu'avec la même vitesse de jet, le transfert de chaleur était amélioré d'environ 10 % lorsque des nervures ont été ajoutées. Le fait de placer plus de nervures sur la surface de l'ailette a augmenté à la fois le taux de transfert de chaleur et la chute de pression. Le rapport de performance avec 4 nervures était supérieur à celui avec 2 nervures, ce qui a montré l'avantage d'utiliser plus de nervures surtout lorsque la taille des dissipateurs de chaleur devient critique. [81]

#### II.2.4. Optimisation des dissipateurs thermiques par fluide de travail

**Keshavarz et al. (2013)** ont examiné numériquement à l'aide d'outils (CFD), le coefficient de transfert de chaleur convectif, la chute de pression et le débit massique dans un dissipateur thermique à mini-canaux contenant du SiC et TiO<sub>2</sub> sous forme de nanoparticules. En outre, l'effet d'une fraction volumique de nanoparticules sur le coefficient de transfert de chaleur convectif a été étudié dans différents nombres de Reynolds. Les résultats de la modélisation ont été comparés aux calculs analytiques de référence. Il a été constaté que le coefficient de transfert de chaleur est devenu plus élevé avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules et du nombre de Reynolds. Le bon accord entre les résultats de modélisation CFD et les calculs analytiques référencés a été démontré. [82]

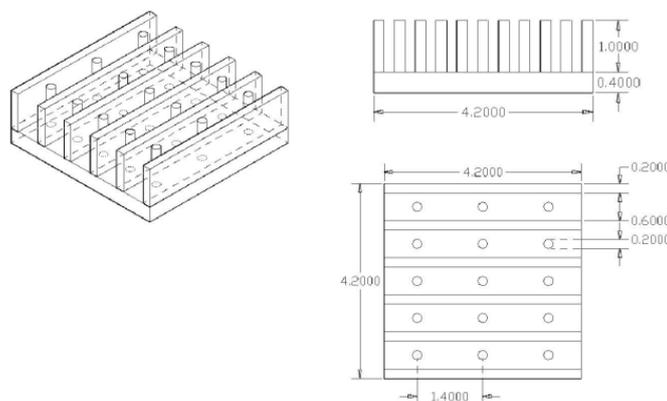
Une étude numérique sur l'application des nano-fluides a été réalisée par **Seyf et Feizbakhshi (2012)** dans les dissipateurs thermiques à micro-ailettes à broches (MPFHSs) en utilisant la méthode du volume fini. L'eau DI a été utilisée comme liquide de refroidissement de base tandis que le CuO et l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ont été utilisés comme des nanoparticules. Les résultats ont montré une amélioration significative du transfert de chaleur dans le MPFHS en raison de la suspension des nanoparticules CuO ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans le fluide de base par rapport à l'eau pure. Ainsi, l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, qui est responsable d'une meilleure performance de transfert de chaleur, a entraîné une baisse de pression plus élevée ou un nombre plus élevé d'Euler dans le MPFHS, mais les améliorations ont été faibles, en particulier pour

les fractions à faible volume de particules. Enfin, il a été constaté qu'avec la diminution du diamètre des particules, le nombre de Nusselt a augmenté pour le nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau tandis que diminué pour le nanofluide  $\text{CuO}$ -eau. [83]



**Figure II.22 :** Schéma du dissipateur thermique à micro-ailettes à broches. [83]

**Zirakzadeh et al. (2012)** ont étudié expérimentalement les caractéristiques de transfert de chaleur d'un nouveau type de dissipateur thermique à ailettes à plaques miniature refroidi par des nano-fluides  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /eau. Le dissipateur de chaleur était fabriqué à partir d'aluminium, isolé par des plaques de recouvrement en plexiglas et composé de cinq canaux rectangulaires à ailettes à goupille d'une longueur de 42 mm. Des essais ont été effectués tout en fournissant un flux de chaleur de  $180 \text{ W/cm}^2$  au fond du dissipateur thermique. Les résultats expérimentaux ont montré que la dispersion des nanoparticules d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans l'eau augmentait considérablement le coefficient global de transfert de chaleur, tandis que la résistance thermique du dissipateur de chaleur diminuait. De plus, le dissipateur thermique à ailettes à plaques a augmenté le coefficient de transfert de chaleur jusqu'à 20 % par rapport au dissipateur thermique à ailettes conventionnel. [84]

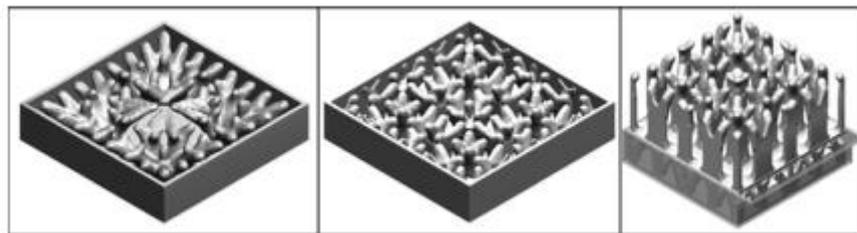


**Figure II.23 :** Les dimensions du dissipateur thermique. [84]

Une autre expérience en utilisant le même nano-fluide a été effectuée par **Ho et al. (2010)** pour étudier les performances de refroidissement convectif forcé d'un dissipateur thermique à micro-canaux en cuivre avec le  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$  comme liquide de refroidissement. Le dissipateur thermique à micro-canaux fabriqué a été composé de 25 micro-canaux rectangulaires parallèles de longueur de 50 mm avec une section transversale de  $283 \mu\text{m}$  en largeur par  $800 \mu\text{m}$  en hauteur pour chaque microchaîne. Les résultats ont montré que le dissipateur de chaleur refroidi par nano-fluide a été plus performant que celui refroidi par eau, avec un coefficient de transfert de chaleur moyen nettement plus élevé et donc une résistance thermique et une température de paroi nettement plus faibles. [85]

### II.3. Dissipateur de chaleur optimisé pour la topologie

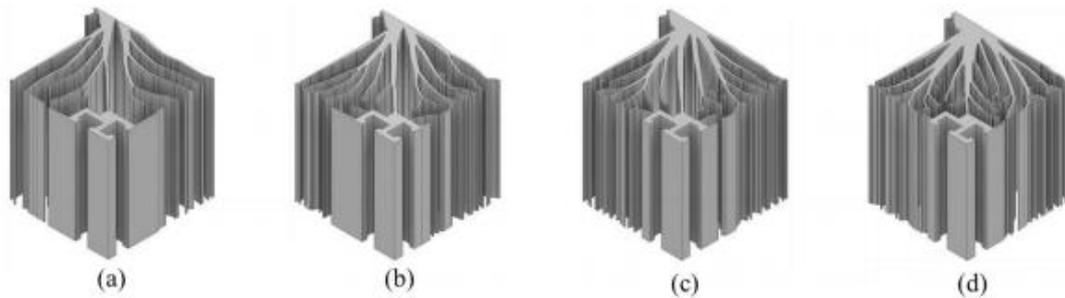
**Iradukunda et al. (2020)** ont utilisé l'optimisation de topologie (TO) pour générer des structures d'épandage de chaleur optimales couplées avec des matériaux à changement de phase PCM, en conjonction avec la fabrication additive (AM), en particulier le frittage direct au laser (DMLS), pour fabriquer et tester les conceptions optimales d'ailettes pour un dissipateur thermique latent. Les résultats expérimentaux ont indiqué la capacité des amplificateurs de conductivité thermique (TCE) optimisés pour la topologie à améliorer significativement les performances de PCM par rapport à un modèle de référence avec ailettes à plaques. De plus, la TO et la MA ont été utilisées pour construire un dissipateur thermique hybride avec un refroidissement combiné conduction-convection-latent. Sous une charge pulsée de 50 W, le dissipateur thermique hybride présentait la capacité de réduire la température de pointe jusqu'à  $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$  par rapport à une plaque de référence à ailettes de dimensions similaires. [86]



**Figure II.24 :** Modèles CAD des dissipateurs thermiques. [86]

**Joo et al. (2017)** ont optimisé les performances thermiques d'un dissipateur thermique en convection naturelle en utilisant la méthode d'optimisation de la topologie. Afin de prédire l'influence dépendante de la forme du dissipateur thermique, un modèle de substitution applicable aux structures de forme arbitraire a été utilisé avec l'espacement effectif des canaux.

La performance thermique du dissipateur thermique optimisé a été comparée à celle d'un dissipateur thermique à plaque-ailette à partir des corrélations numériques. Pour déterminer les performances thermiques du dissipateur thermique optimisé, la méthode des volumes finis a été utilisée et implémentée dans le logiciel ANSYS. Les quatre fractions volumiques utilisées dans ce travail sont visibles sur la figure 25. Les résultats obtenus ont montré que la résistance thermique du dissipateur thermique optimisé est inférieure de 15 % à celle du dissipateur thermique conventionnel avec une économie de matériau de 26 %. [87]



**Figure II.25** : Dissipateur thermique optimisé pour la topologie 3D avec fraction volumique.

[87]

**Dede et al. (2015)** ont présenté une méthode d'optimisation de la topologie pour la conduction en régime permanent avec convection latérale pour concevoir un dissipateur thermique 3D refroidi par air. Dans cette recherche, l'approche de fabrication de couches additives (ALM) a été utilisée pour fabriquer le dissipateur thermique optimisé. L'avantage d'utiliser l'approche ALM est de concevoir des géométries complexes ou des profils externes qui ne peuvent pas être conçus en utilisant la méthode de fabrication conventionnelle. La résistance thermique et la chute de pression pour un dissipateur thermique optimisé par rapport à différents débits d'air ont été étudiées (numériquement et expérimentalement) et comparées à des conceptions de dissipateur thermique qui ont une plaque droite, une plaque radiale, une plaque droite étagée et un agencement d'ailettes à broches décalées qui est fabriqué en utilisant un usinage conventionnel techniques dans les genres littéraires. Les résultats ont montré que le dissipateur thermique optimisé avait une résistance thermique et une perte de charge inférieures à celles des autres géométries de dissipateur thermique. [88]

## II.4. Conclusion

Cette partie de notre étude a été consacré à la récolte des divers travaux scientifiques et de recherches sur l'évolution des systèmes de refroidissements plus particulièrement les

dissipateurs thermiques et leurs performances. Plusieurs conceptions ont été présentées pour avoir une meilleure performance thermique. L'optimisation des dissipateurs thermique est introduite dans ce volet pour l'effet des différents paramètres sur la dissipation de chaleur et d'en avoir la meilleure.

# **Chapitre III :**

## **Résolution numérique**

### III. Introduction

Avec la complexité croissante des composants électroniques et de leurs systèmes, leurs solutions de refroidissement deviennent un enjeu important, et les dissipateurs de chaleur sont la solution la plus largement appliquée dans l'industrie. Des méthodes théoriques, expérimentales et numériques peuvent être utilisées pour déterminer la performance thermique d'un dissipateur de chaleur. La méthode des éléments finis est probablement la technique numérique la plus appropriée pour simuler les champs thermiques des dissipateurs de chaleur. Dans ce chapitre, la modélisation thermique d'un dissipateur thermique à ailettes planes monté à un microprocesseur a été effectuée à l'aide du logiciel d'analyse d'éléments finis ABAQUS.

#### III.1. Présentation de logiciel de simulation

ABAQUS est une suite de puissants programmes de simulation d'ingénierie, basés sur la méthode des éléments finis, qui peuvent résoudre des problèmes allant d'analyses linéaires relativement simples aux simulations non linéaires les plus difficiles. Il contient une vaste bibliothèque d'éléments qui peuvent modéliser pratiquement n'importe quelle géométrie. Il a une liste tout aussi vaste de modèles de matériaux qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux d'ingénierie typiques. Conçu comme un outil de simulation polyvalent, ABAQUS peut être utilisé pour étudier plus que des problèmes structurels (stress/déplacement). Il peut simuler des problèmes dans des domaines aussi divers que le transfert de chaleur, la diffusion de masse, la gestion thermique des composants électriques, l'acoustique, la mécanique du sol et l'analyse piézoélectrique. [89]

D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle. [90]

Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment) est un environnement graphique interactif pour Abaqus. Il permet de créer des modèles rapidement et facilement en produisant ou en important la géométrie de la structure à analyser et en décomposant la géométrie en régions meshable. Les propriétés physiques et matérielles peuvent être attribuées à la géométrie, ainsi qu'aux charges et aux conditions limites. Abaqus/CAE contient des options très puissantes pour intégrer la géométrie et vérifier le modèle d'analyse qui en résulte. Une fois le modèle terminé, Abaqus/CAE peut soumettre, surveiller et contrôler les tâches d'analyse. Le module de visualisation peut ensuite être utilisé pour interpréter les résultats. [89]

L'ABAQUS a deux types d'analyse structurelle - standard et explicite. L'ABAQUS/Standard est plus efficace pour résoudre les problèmes lisses non linéaires ; d'autre part, ABAQUS/Explicit est le choix pour une analyse de propagation d'onde. Pour cette simulation, la nature de la modélisation de processus est d'une caractéristique lisse non linéaire. De plus, il n'y a pas d'étude d'onde de stress nécessaire dans cette simulation. Par conséquent, une analyse standard (implicite) est considérée dans ABAQUS pour ce travail.

### III.2. Méthode des éléments finis

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. C'est une technique de calcul pour obtenir des solutions approximatives aux équations aux dérivées partielles qui se produisent dans les applications scientifiques et d'ingénierie. [91]

Plutôt que de rapprocher l'équation différentielle partielle directement, la méthode des éléments finis utilise un problème variationnel qui implique une partie intégrante de l'équation différentielle sur le domaine du modèle. Ce domaine est divisé en un certain nombre de sous-domaines appelés éléments finis, et la solution de l'équation différentielle partielle est approximative par une fonction polynomiale simple sur chaque élément. Ces polynômes doivent être assemblés afin que la solution approximative ait un degré approprié de lissage sur l'ensemble du domaine. Une fois cela fait, l'intégrale variationnelle est évaluée comme une somme de contributions de chaque élément fini. Le résultat est un ensemble d'équations algébriques pour la solution approximative ayant une taille finie plutôt que l'équation différentielle partielle infinie-dimensionnelle originale. [91]

#### III.2.1. Démarche éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis sont les suivantes :

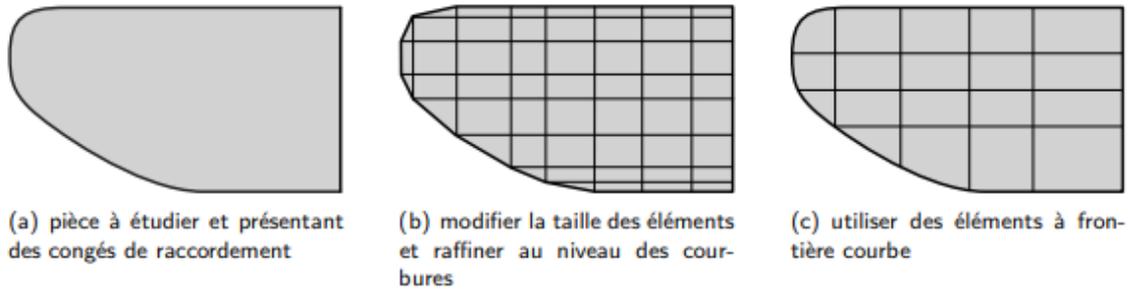
- **Discretisation du milieu continu en sous domaines**

Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines :

$$D = \sum_{e=1}^{n_e} D_e \quad \text{tel que} \quad \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left( \bigcup_{\epsilon} D_e \right) = D \quad (\text{III.1})$$

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune. [92]

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés.



**Figure III.01** : Erreur de discrétisation géométrique. [91]

- **Construction de l'approximation nodale par sous domaine**

La méthode des éléments finis est basée sur la construction systématique d'une approximation  $u^*$  du champ des variables  $u$  par sous domaine. Cette approximation est construite sur les valeurs approchées du champ aux nœuds de l'élément considéré, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale : [92]

$$\forall M \in D_e, u^*(M) = N(M)u_n \quad (\text{III.2})$$

Où  $u^*(M)$  représente la valeur de la fonction approchée en tout point  $M$  de l'élément et  $N$ , la matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément un variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément.

- **Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème**

Afin de présenter la démarche générale utilisée pour construire les formes matricielles et vectorielles sur chaque élément, la forme intégrale du Principe des Travaux Virtuels associée à un problème de mécanique des structures est utilisée comme point de départ. Cette forme intégrale est de même type que celles pouvant être déduites des méthodes variationnelles et la généralisation à des problèmes de physique est donc simple. [92]

- **Assemblage des matrices élémentaires**

Les règles d'assemblage sont définies par la relation :

$$D \simeq \sum_{e=1}^{n_e} D_e \quad (\text{III.3})$$

L'assemblage des matrices élémentaires masse  $M_e$  et raideur  $K_e$  s'effectue selon les mêmes règles. Ces règles sont définies par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément : [92]

$$\sum_{e=1}^{n_e} \delta \mathbf{u}_n^T M_e \ddot{\mathbf{u}}_n = \delta \mathbf{U}^T M \ddot{\mathbf{U}} \quad \text{et} \quad \sum_{e=1}^{n_e} \delta \mathbf{u}_n^T K_e \mathbf{u}_n = \delta \mathbf{U}^T K \mathbf{U} \quad (\text{III.4})$$

Cette opération traduit simplement que la forme quadratique associée à l'ensemble du domaine est la somme des formes quadratiques des sous-domaines. Elle consiste à « ranger » 1 dans une matrice globale, les termes des matrices élémentaires. La forme de cette matrice dépend bien évidemment de l'ordre dans lequel sont définies les variables globales de  $\mathbf{U}$ .

- **Prise en compte des conditions aux limites**

La résolution des déplacements nodaux inconnus. Les équations d'équilibre globales doivent être modifiées pour tenir compte des conditions aux limites du problème. Après l'incorporation des conditions aux limites. [93]

- **Résolution du système d'équations**

La détermination des zones dans la structure où se produisent de grandes déformations et de grandes contraintes est généralement importante pour prendre des décisions de conception. Les programmes informatiques du post processeur aident l'utilisateur à interpréter les résultats en les affichant sous forme graphique. [93]

### III.3. Description du problème

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet des différents paramètres y compris : le nombre des ailettes, le flux de chaleur appliqué sur le microprocesseur, la géométrie et le matériau du dissipateur de chaleur sur les performances de ce dernier. Pour ce faire, une analyse thermique-électrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes planes avec un microprocesseur en cuivre a été effectué à partir du logiciel de modélisation ABAQUS.

La solution du problème est en deux étapes : la première étape est une étape thermique-électrique dans laquelle un flux thermique est appliqué, ce qui va générer une énergie thermique du microprocesseur. La deuxième étape est une étape de transfert de chaleur, le courant est coupé, et l'énergie thermique est dissipée au dissipateur de chaleur. Les équations conçues pour le problème étudié sont :

Analyse électrique

- Equation de Maxwell

$$\int_s \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \, dS = \int_v \mathbf{r}_c \, dV \tag{III.5}$$

Énergie électrique

- La loi de Joule

$$P_{ec} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \tag{III.6}$$

Analyse thermique

- Équation de chaleur

$$\int_v \rho \dot{U} \, dV = \int_s \mathbf{q} \, dS + \int_v \mathbf{r} \, dV \tag{III.7}$$

III.3.1. Dissipateur de chaleur à ailettes planes

Dans cette étude, un dissipateur de chaleur à ailettes planes de longueur (L), de largeur (B), de hauteur (H) et d'épaisseur (t<sub>b</sub>) est utilisé. Il se constitue de (N) ailettes, l'épaisseur de chaque ailette est (t) et la distance entre deux ailettes successives est (S) (figure III.1).

Les dimensions du dissipateur thermique sont représentées dans le tableau III.1.

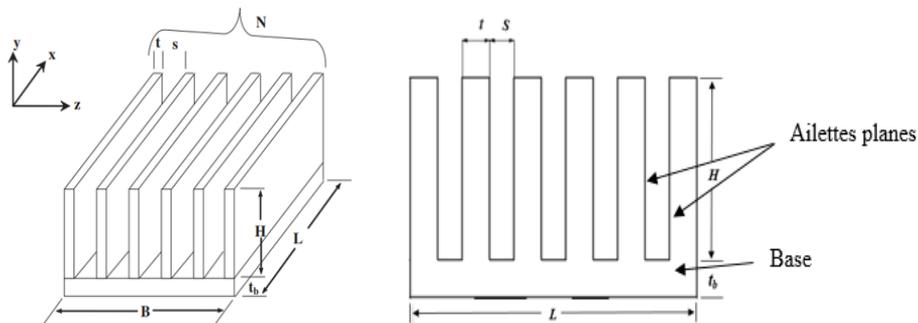


Figure III.02 : Géométrie du dissipateur de chaleur.

Tableau III.1 : Dimensions du dissipateur à ailettes planes.

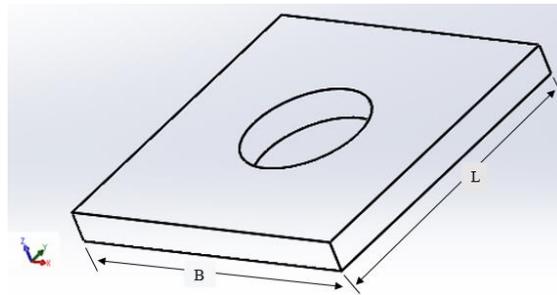
Symboles	Paramètres	Dimensions (mm)
L	Longueur de la base	30
B	Largeur de la base	28
t <sub>b</sub>	Épaisseur de la base	5

H	Hauteur des ailettes	30
t	Épaisseur des ailettes	4
S	Distance entre deux ailettes successives	2,5
N	Nombre des ailettes	5

### II.3.2. Microprocesseur

Le microprocesseur étudié ici est considéré comme une source thermique qui génère de l'énergie.

Ses dimensions sont représentées dans le tableau III.2. Afin de rendre le champ électrique non uniforme, un trou est modelé sur le microprocesseur.



**Figure III.03 :** Le microprocesseur étudié.

**Tableau III.2 :** Dimensions du microprocesseur.

Symboles	Paramètres	Dimensions (mm)
L	Longueur	30
B	Largeur	28
$t_b$	Épaisseur	5
r	Diamètre du trou	5

### III.4. Équations gouvernantes

Les équations gouvernantes pour le problème de dissipation thermique sont Navier Stokes avec l'équation d'énergie. L'équation Navier Stokes est appliquée aux écoulements incompressibles et aux fluides newtoniens, y compris les trois lois principales de conservation, conservation de masse, conservation d'énergie et de la quantité de mouvement. Les équations sont données ci-dessous.

- **Equation de conservation de la masse (continuité)**

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{III.8})$$

$\rho$  c'est la densité du fluide,  $\mathbf{v}$  c'est le vecteur de vitesse et  $\frac{D}{Dt}$  c'est le dérivé matériel.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{III.9})$$

Si le fluide est incompressible, le dérivé de la densité par rapport au temps peut être négligé, et l'équation de continuité dans les coordonnées cartésienne s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.10})$$

Ou  $u$ ,  $v$ ,  $w$  sont les composants de vitesse dans l'écoulement.

- **Equation d'énergie**

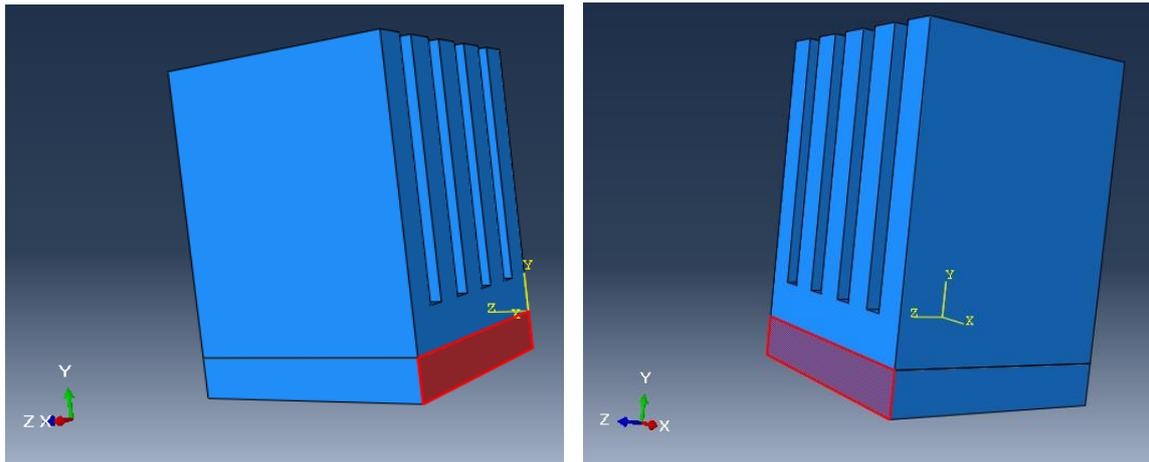
$$U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.11})$$

- **Equation de quantité de mouvement**

$$\rho u_j \frac{\partial (u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [ (\mu + \mu_i) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} ] - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (\text{III.12})$$

### III.5. Les conditions aux limites

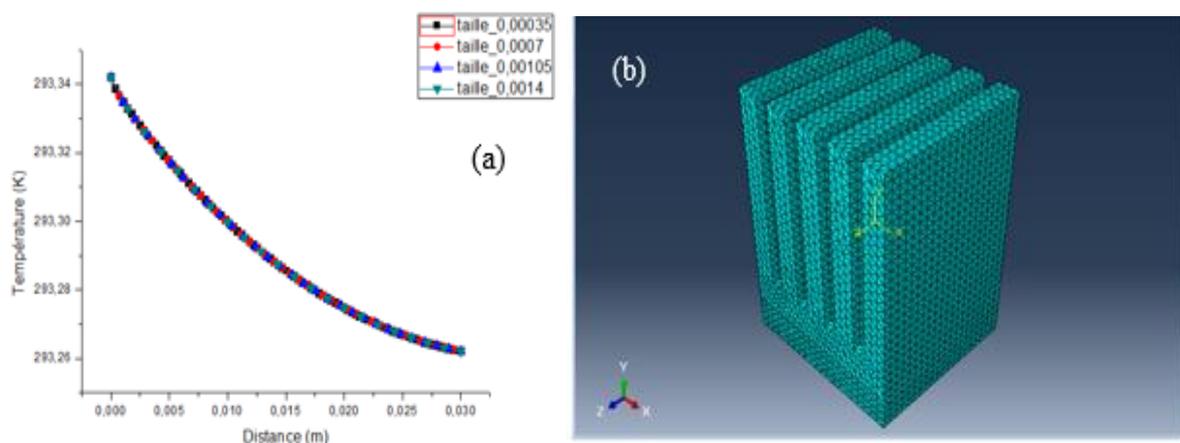
Pour les conditions limites, une interaction et une charge ont été appliquées au modèle, au coefficient de transfert de chaleur et au flux de chaleur du corps. Tout d'abord, une interaction est un objet dépendant de l'étape, dans ce cas elle est analysée dans l'étape de transfert de chaleur. L'interaction créée est une condition de film sur les surfaces exposées au fluide. La condition de film définit la convection à partir de surfaces de modèle et les conditions de film concentré à partir de nœuds. Le coefficient de convection est égale à  $h = 500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  et la température est  $T_{\text{initial}} = T_{\text{ambiante}} = 293 \text{ K}$ . Pour simuler la dilatation thermique, une charge doit être appliquée, dans ce cas, une charge égale à  $50000 \text{ W/m}^2$  est appliqué sur un côté du microprocesseur et un potentiel électrique est appliqué sur l'autre côté. La figure III.4 montre les conditions limites appliquées au modèle.



**Figure III.04 :** Conditions aux limites appliquées sur le microprocesseur.

### III.6. Indépendance du maillage

La seule et unique façon d'établir des solutions indépendantes de la grille est de configurer un modèle avec un maillage plus fin et de l'analyser pour voir s'il y a des différences majeures dans les grandeurs scalaires et les vecteurs. Pour assurer une solution indépendante du maillage, un test de dépendance de la grille a été effectué pour examiner la qualité du maillage afin d'assurer la fiabilité et l'exactitude des résultats de simulation tout en consommant un temps de calcul minimal. Un maillage tétraédrique de calcul a été utilisé, et quatre types de densité de grille, 60148 (grossière), 142409 (intermédiaire), 442055 (fine) et 2968219 (très fine) ont été testées et la température du dissipateur thermique en aluminium a été choisie comme paramètre de surveillance. Comme le montre la figure III.5a, les distributions de température sont assez semblables.

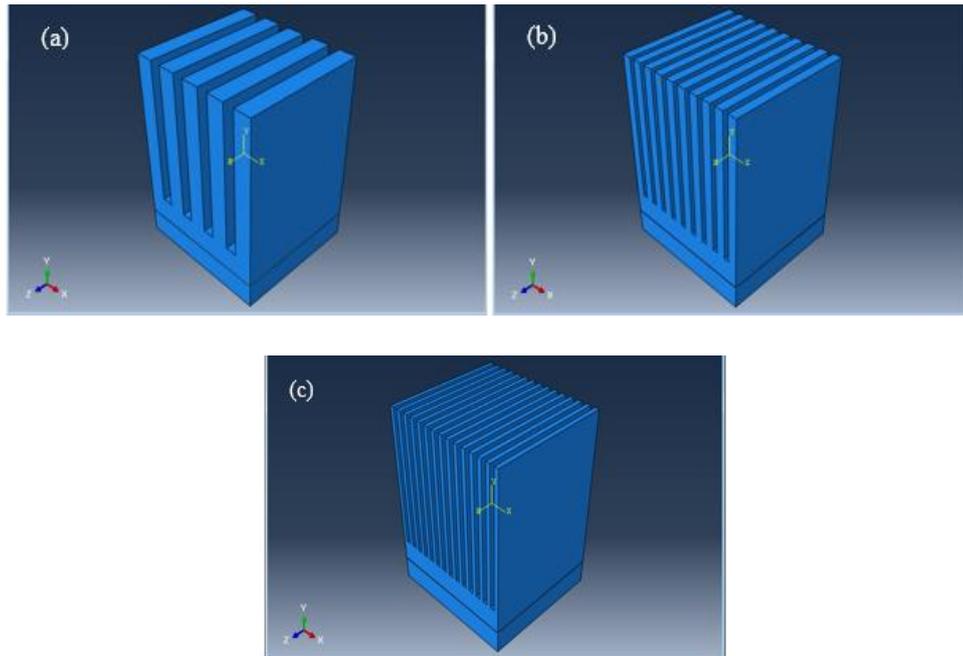


**Figure III.05 :** (a) résultats du test de maillage, (b) maillage finale.

### III.7. Cas étudiés

#### III.7.1. Variation du nombre des ailettes

Afin d'étudier l'effet de la variation du nombre des ailettes sur la dissipation de chaleur, un flux thermique constant de  $50000 \text{ W/m}^2$  est appliqué sur le microprocesseur et le nombre des ailettes est varié trois fois : 5 ailettes, 10 ailettes et 15 ailettes. La figure III.6 représente les dissipateurs de chaleur étudiés.



**Figure III.06 :** Cas de dissipateur de chaleur avec : (a) 5 ailettes, (b) 10 ailettes et (c) 15 ailettes.

#### III.7.2. Variation du matériau du dissipateur thermique

Dans ce cas, seul le matériau du dissipateur de chaleur est varié, en gardant le cuivre comme matériau du microprocesseur et en fixant le courant à  $50000 \text{ W/m}^2$  et le nombre des ailettes à 5 ailettes. Trois matériaux sont utilisés : l'aluminium, le cuivre et le graphène. Les propriétés de chacun de ces matériaux sont représentées dans le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.k)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité électrique ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>
Aluminium	200	890	2700	0
Cuivre	394	385	8960	58
Graphène	5300	643	2267	0

### III.7.3. Variation du flux de chaleur

Dans ce cas, l'effet de la variation du courant appliqué sur le microprocesseur est étudié. Pour ce faire, un dissipateur de chaleur en aluminium avec un nombre des ailettes qui est égal à 5 est utilisé. Le courant est varié trois fois :  $25000 \text{ W/m}^2$ ,  $50000 \text{ W/m}^2$  et  $75000 \text{ W/m}^2$ , et les performances du dissipateur thermique sont analysés.

### III.7.4. Perforation des ailettes

Dans cette section, des perforations sont formés dans les ailettes du dissipateur de chaleur. Le diamètre de chaque perforation est de 1.5 (mm) et l'espace entre deux perforations est de 7 (mm). Le nombre total des perforations est 80. Les résultats obtenus sont comparées avec celles du dissipateur de chaleur à ailettes pleines.

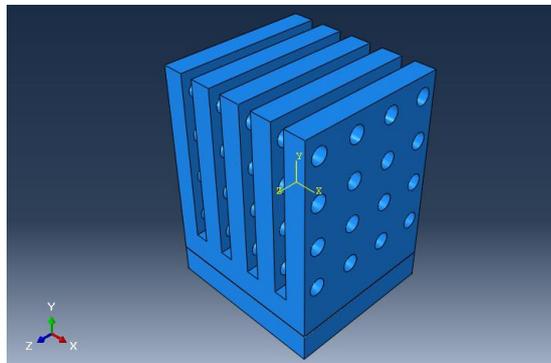


Figure III.07 : Dissipateur de chaleur étudié.

### III.7.5. Dissipateur de chaleur à ailettes rectangulaire

Afin de comparer les performances du dissipateur de chaleur à ailettes planes avec celle du dissipateur de chaleur à ailettes rectangulaires et à ailettes perforées, un dissipateur thermique avec 20 ailettes planes rectangulaires est étudié, dont les dimensions des ailettes sont (6×4) (mm) et l'espacement entre deux ailettes est de 2 (mm).

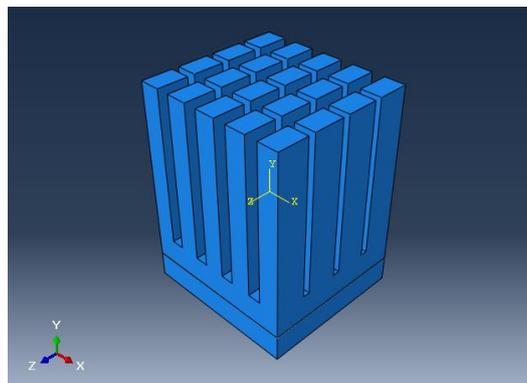


Figure III.08 : Dissipateur de chaleur étudié.

### III.8. Interprétation des résultats

Afin d'analyser la distribution du flux et de la température pour les différents cas, le path illustré ci-dessous a été choisis.

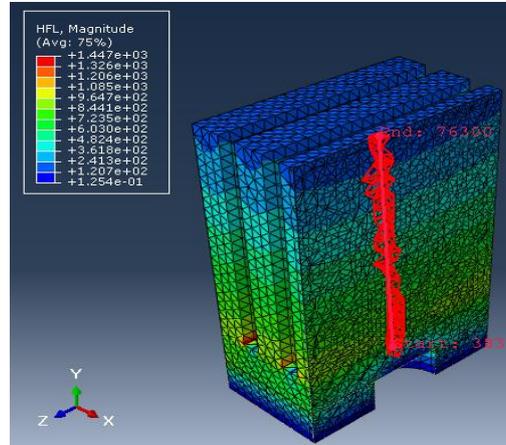


Figure III.09 : Path étudié.

#### III.8.1. Effet du nombre des ailettes

La figure III.09 montre la distribution du flux de chaleur et de la température totale dans le dissipateur de chaleur à ailettes planes, où la base est soumise à un flux de chaleur constant. On peut voir que la température n'est pas uniforme dans les ailettes ou le fluide de refroidissement. La chaleur appliquée à la base du dissipateur thermique se propage aux ailettes de sorte que la température est élevée en bas du dissipateur thermique et atteint la valeur de 71.7 °C, mais elle diminue le long de la hauteur des ailettes jusqu'au 43.5 °C en raison de l'interaction du fluide de refroidissement avec les ailettes, ce qui les refroidit. Cela est dû au fait que le transfert de chaleur par convection est composé de deux mécanismes, à savoir le transfert d'énergie dû au mouvement massif du fluide de travail et le transfert d'énergie dû à la diffusion de chaleur.

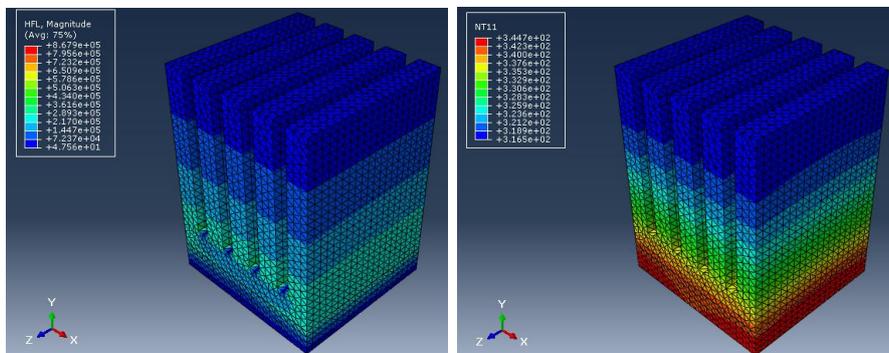
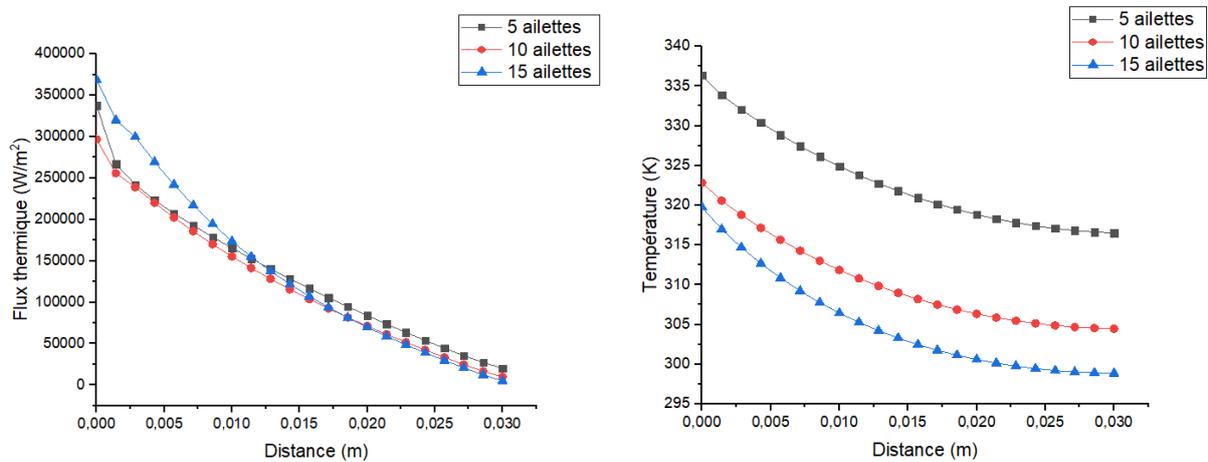


Figure III.10 : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur avec 5 ailettes.

A partir de la figure III.11 qui représente l'influence du nombre des ailettes sur la dissipation de chaleur, on observe que le cas avec un dissipateur de chaleur de 15 ailettes présente le flux de chaleur le plus élevé de  $3.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  et la température la plus basse de  $55.34 \text{ }^\circ\text{C}$ , cette valeur est plus élevée pour les dissipateur de chaleur avec 5 et 10 ailettes. Cela peut être expliqué par le fait que le dissipateur thermique avec 15 ailettes a le plus grand nombre des ailettes, c'est-à-dire, il a plus de surface de transfert de chaleur avec le fluide de refroidissement. Donc, on constate que le flux de chaleur est proportionnel à la surface d'échange, tel que, plus cette dernière est grande plus le flux thermique est élevé. On constate aussi qu'une relation inverse se produit entre la température et le nombre des ailettes, tel que, le microprocesseur est mieux refroidi lorsque le nombre des ailettes est élevé.



**Figure III.11 :** Effet de la variation du nombre des ailettes.

### III.8.2. Effet du matériau du dissipateur thermique

L'influence du matériau du dissipateur de chaleur sur la distribution du flux et des lignes isothermes est montrée sur les figures III.12, III.13 et III.14. Comme l'on peut voir, le microprocesseur dans le cas de dissipateur de chaleur en Graphène est mieux refroidi et il a la plus basse des températures, tandis que celle du dissipateur de chaleur en cuivre est plus élevée avec une valeur de  $62.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , cela est due à un contact presque parfait entre le microprocesseur et le dissipateur thermique qui portent le même matériau (cuivre), et au fait que la conductivité thermique du Graphène et la conductivité thermique du cuivre sont plus élevée que celle de l'aluminium.

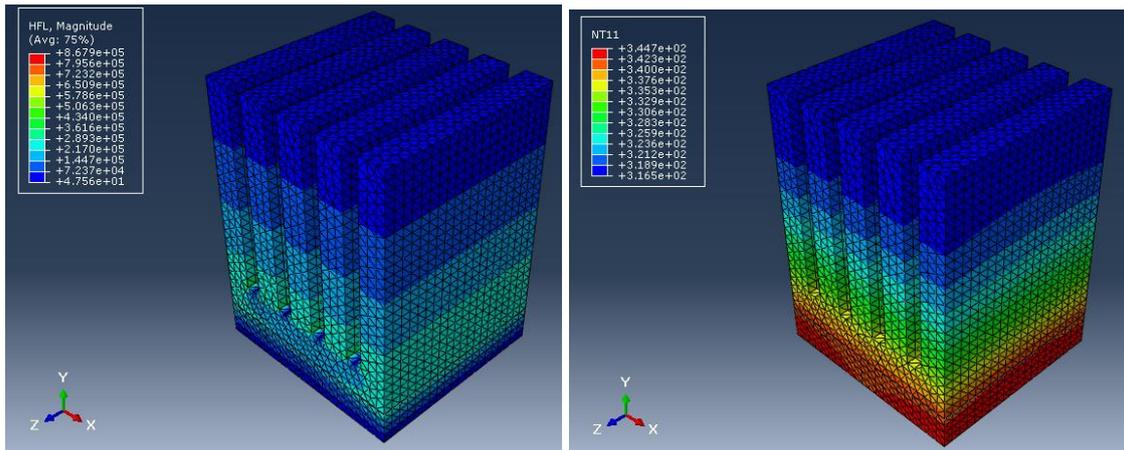


Figure III.12 : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en Aluminium.

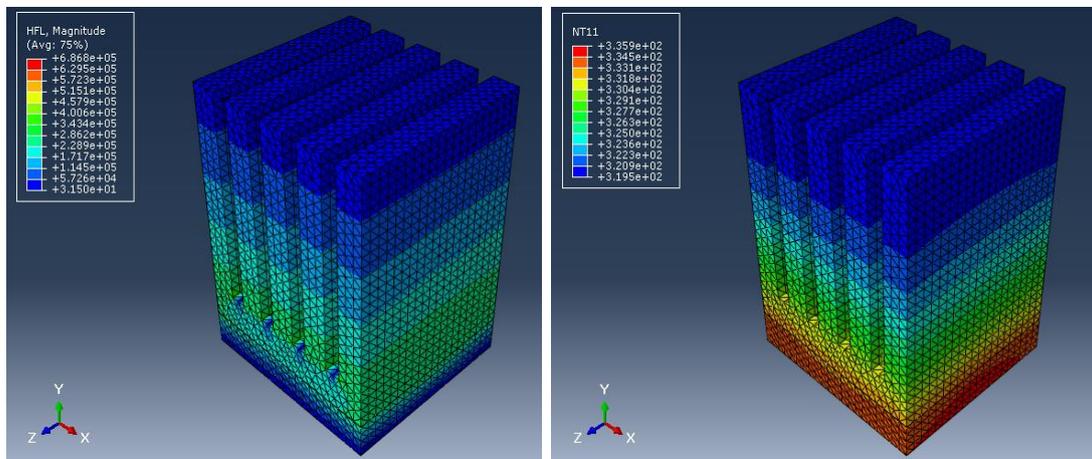


Figure III.13 : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en cuivre.

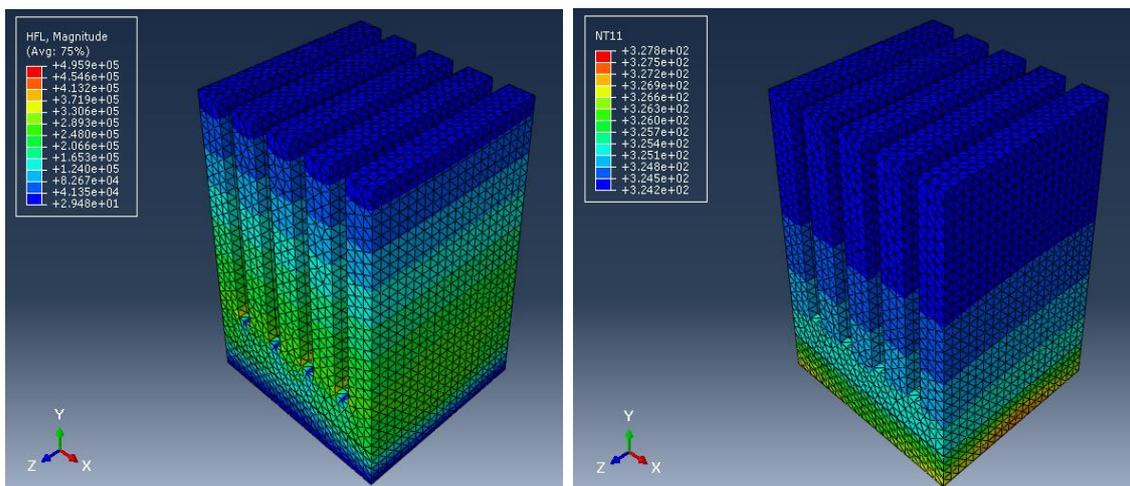
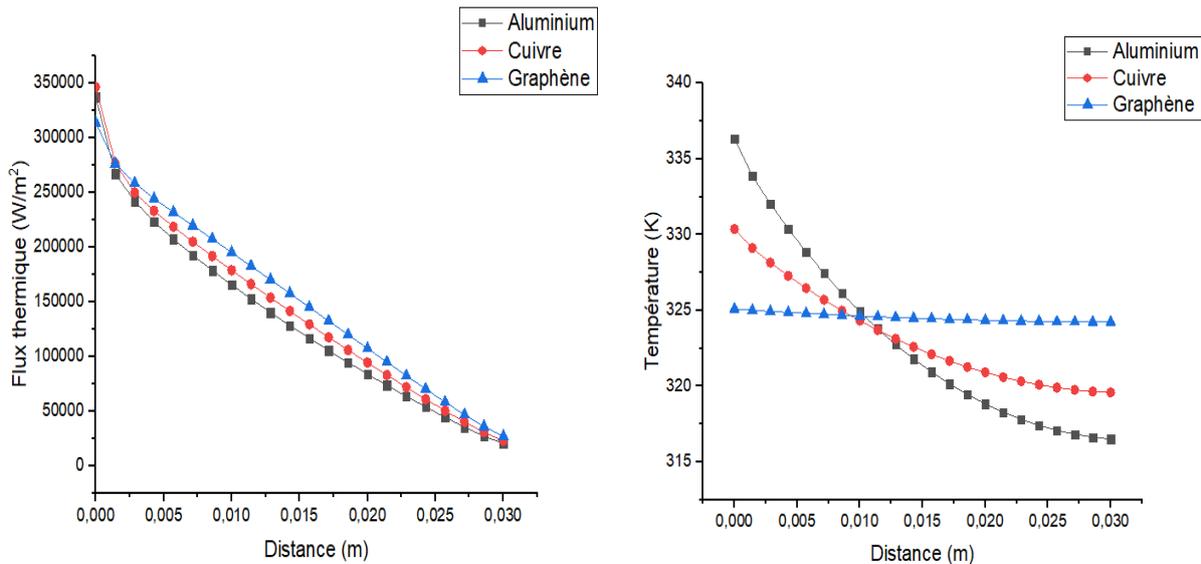


Figure III.14 : Distribution du flux et de la température ; cas de dissipateur de chaleur en graphène.

A partir de la figure III.15 qui représente l'influence du matériau des ailettes sur la dissipation de chaleur, il est clair qu'il y a une relation inversement proportionnelle du flux de chaleur par rapport à la conductivité thermique du matériau, pour le graphène le flux de chaleur varie entre  $29.48 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  et  $4.95 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  et varie entre  $31.5 \text{ W/m}^2$  et  $6.86 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  pour le cuivre, hors que pour l'aluminium il varie entre  $4.75 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  et  $8.67 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ . Donc, on peut dire que la conductivité thermique du matériau du dissipateur thermique qui présente une mesure de sa capacité à conduire la chaleur a un impact direct sur le processus de dissipation de chaleur.



**Figure III.15 :** Effet de la variation du matériau du dissipateur de chaleur.

### III.8.3. Effet du flux de chaleur

Dans cette section, les effets de la variation du flux thermique sur les performances de transfert de chaleur sont examinés numériquement. Les figures III.16 et III.17 indiquent la plage des contours de température pour le dissipateur thermique en aluminium pour différents flux de chaleur. La figure dicte qu'une zone chaude de température plus élevée se forme près de la base du dissipateur thermique et que la distribution de la température pour un flux de chaleur de  $25000 \text{ W/m}^2$  est nettement inférieure aux autres flux. La température continue d'augmenter avec l'augmentation du flux de chaleur et atteint une valeur de  $136.3 \text{ °C}$ . Cela peut s'expliquer par l'équation (I.2) qui montre que le gradient de température est proportionnel au flux de chaleur. Cela implique que le flux de chaleur toujours croissant est défavorable à l'amélioration de l'uniformité de la température.

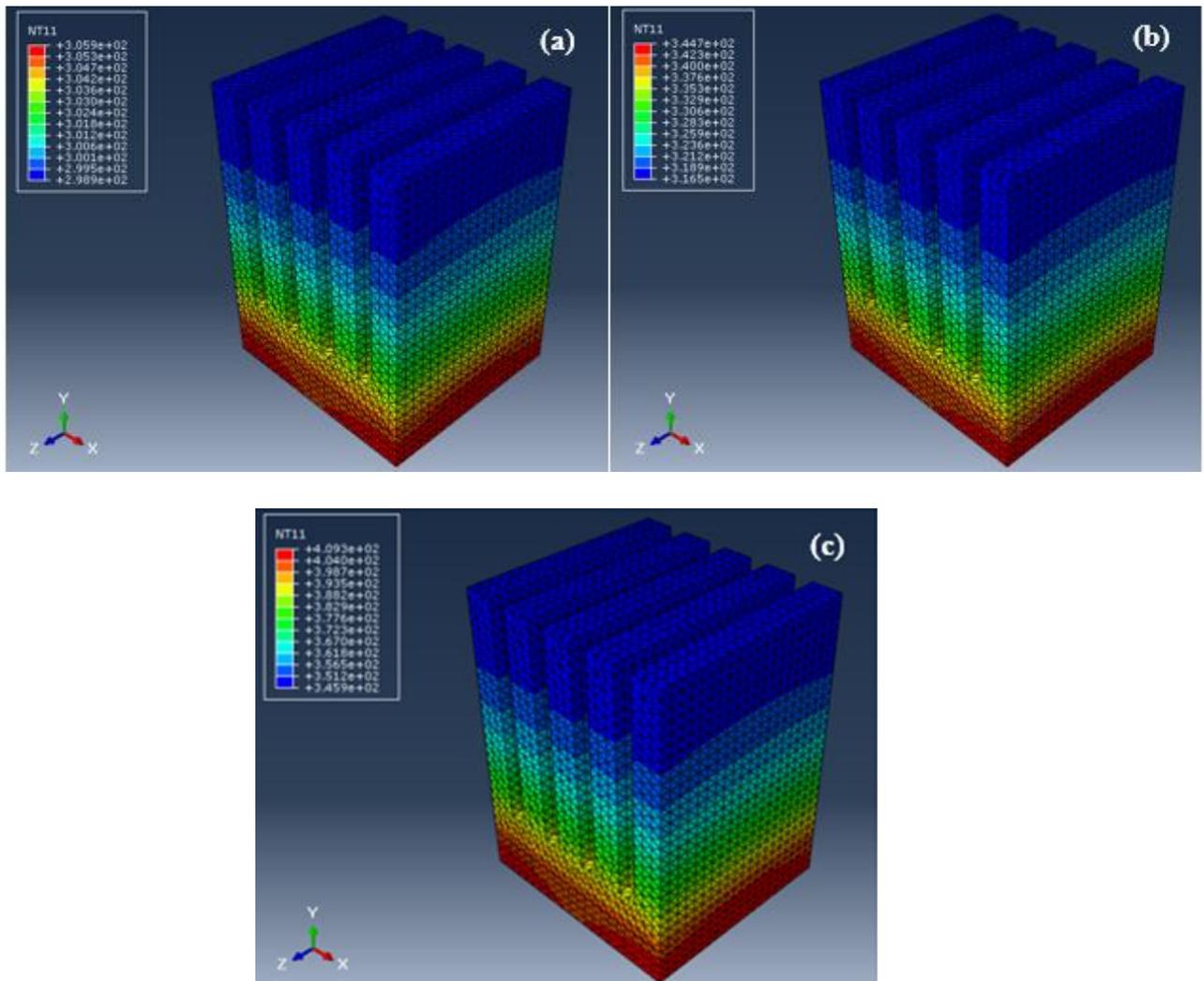


Figure III.16 : Distribution de la température ; (a) cas de flux  $Q = 25000 \text{ W/m}^2$  ; (b) cas de flux  $Q = 50000 \text{ W/m}^2$  et (c) cas de flux  $Q = 75000 \text{ W/m}^2$ .

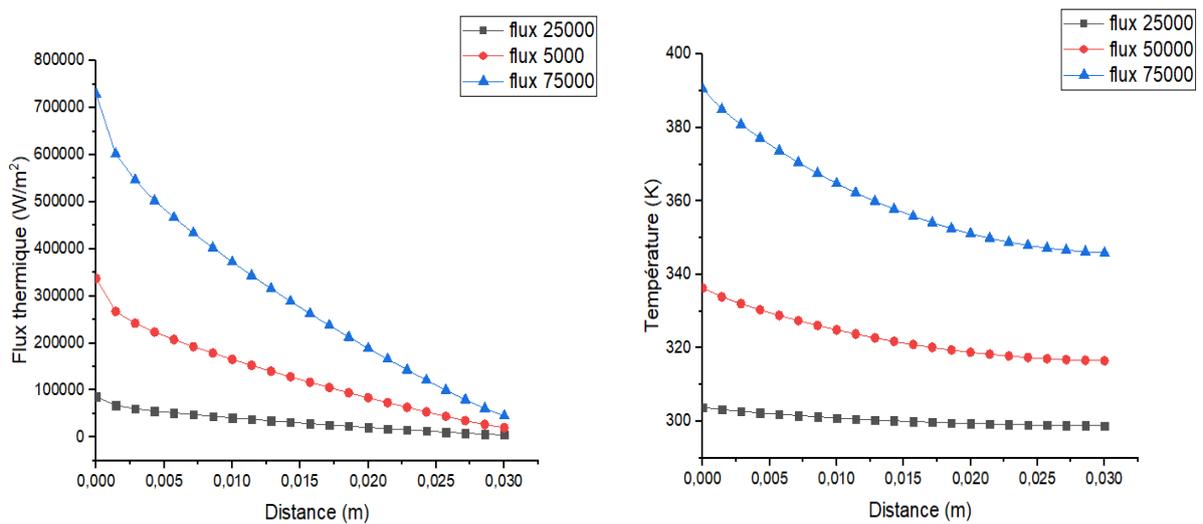
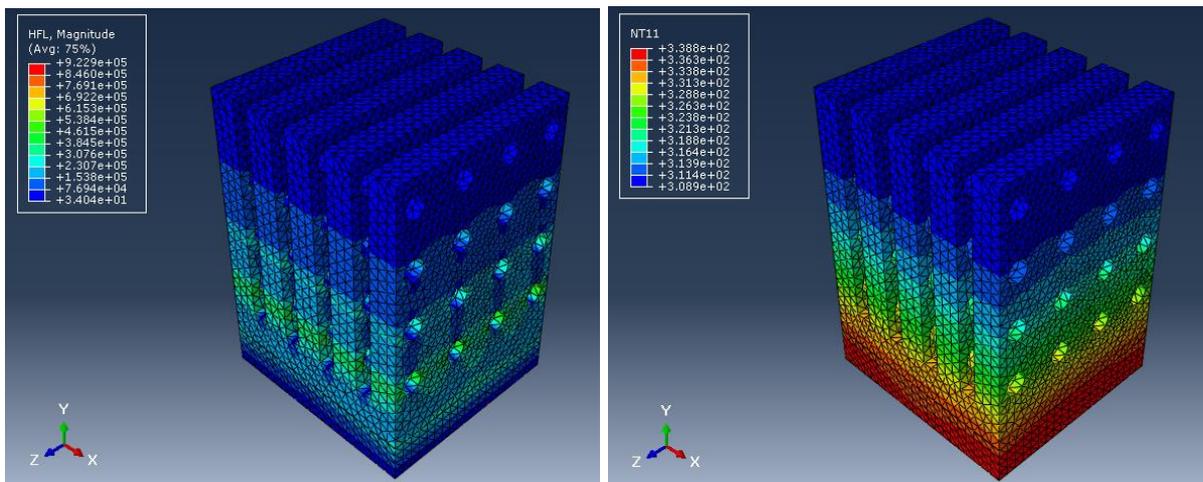


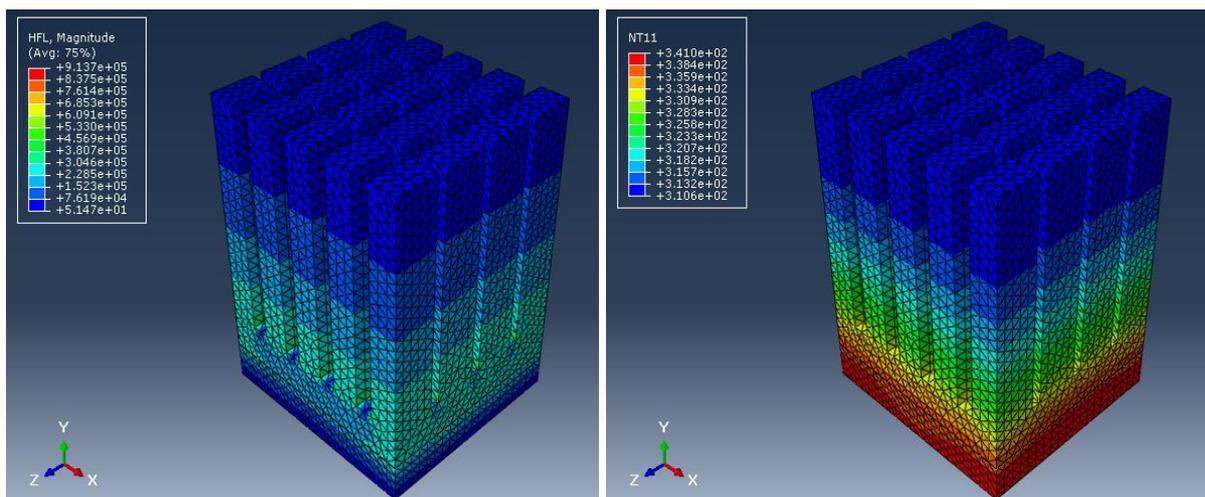
Figure III.17 : Effet de la variation du flux de chaleur.

### III.8.4. Effet de la géométrie

La distribution du flux et de la température pour le dissipateur de chaleur à ailettes perforés et à ailettes rectangulaires est illustrée dans les figures III.17 et III.18. Il est clair que la distribution du flux thermique dans le cas des ailettes avec 80 perforations n'est pas uniforme et elle est plus élevée pour le dissipateur de chaleur à ailettes perforées et à ailettes rectangulaires en comparaison avec le dissipateur de chaleur à ailettes pleines. Quand on parle de la température, le dissipateur thermique à ailettes perforées présente les performances thermiques les plus élevées. On observe que le microprocesseur est mieux refroidi dans ce cas.



**Figure III.18 :** Distribution du flux et de la température pour le dissipateur de chaleur à ailettes perforés.



**Figure III.19 :** Distribution du flux et de la température pour le dissipateur de chaleur à ailettes rectangulaire.

La figure III.20 présente l'effet de la variation de la géométrie du dissipateur de chaleur sur ses performances. On observe que la température dans le cas du dissipateur à ailettes pleines est la plus élevée et varie entre 43.5 °C et 71.7 °C. Alors qu'elle est plus basse dans le cas à ailettes rectangulaire avec une valeur de 68 °C, et continue à s'abaisser jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur de 65.8 °C dans le cas à ailettes perforées. On peut dire alors que pour des applications pratiques dans le refroidissement micro-électronique, les dissipateurs thermiques à ailettes perforées offrent des avantages importants en tant que moyen d'obtenir des températures de processeur plus faibles pour réduire la consommation d'énergie.

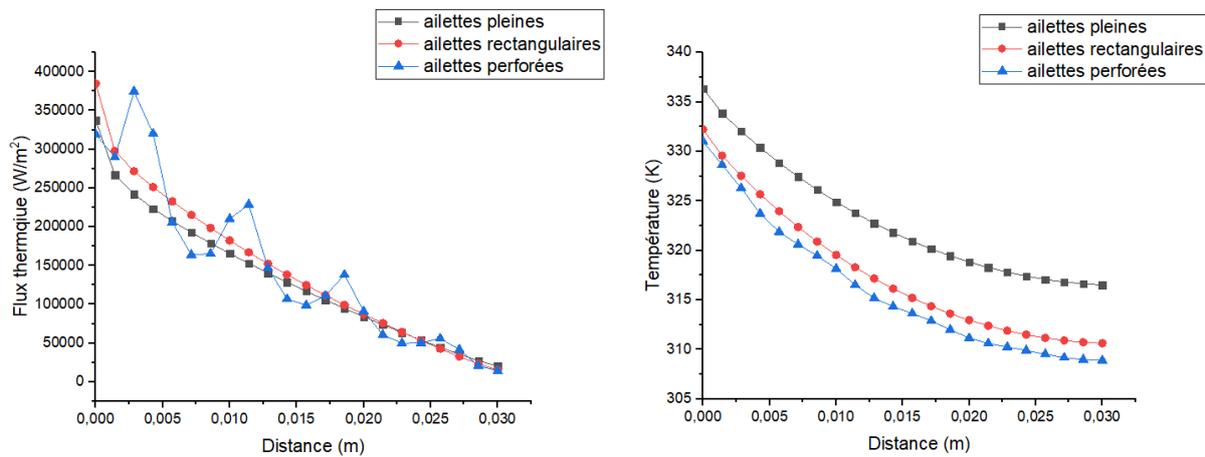


Figure III.20 : Effet des perforations des ailettes.

### III. Conclusion

Les essais effectués pour analyser les performances du dissipateur de chaleur à ailettes planes à l'aide du logiciel d'analyse d'éléments finis ABAQUS ont été déterminés dans ce chapitre. Le principe de fonctionnement du logiciel et une définition de la méthode des éléments finis ont été aussi présentées. Outre la détermination du modèle utilisé, une étude d'indépendance du maillage pour différentes tailles des mailles a été effectuée. Enfin, une discussion des résultats de différentes études réalisées a été présentée.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

Le refroidissement des appareils électroniques est essentiel pour garantir leurs performances fonctionnelles et leur durée de vie opérationnelle. Des avantages tels que l'absence de bruit, la fiabilité, l'absence de demande de puissance parasite et la réduction des exigences d'entretien font du refroidissement passif en utilisant les dissipateurs de chaleur une solution de gestion thermique préférée pour l'électronique. L'objectif de ce mémoire été d'analyser l'impact de différents paramètres : le nombre des ailettes, le flux thermique, la géométrie et le matériau du dissipateur thermique sur les performances thermiques de ce dernier. Pour ce faire, une analyse thermique-électrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes à plaques planes monté sur un microprocesseur a été effectué à partir du logiciel de modélisation ABAQUS. La solution du problème était en deux étapes : la première étape ; une étape thermique-électrique dans laquelle un flux thermique est appliqué, ce qui va générer une énergie thermique du microprocesseur. La deuxième étape ; une étape de transfert de chaleur, le courant est coupé, et l'énergie thermique est dissipée au dissipateur de chaleur. Le dissipateur thermique à ailettes planes en aluminium avec 5 ailettes a été établi comme base de comparaison des performances et les deux paramètres d'évaluation étaient la distribution du flux thermique et de la température.

L'influence du nombre des ailettes a d'abord été étudiée. Il a été observé que l'augmentation du nombre d'ailettes améliore la dissipation de la chaleur. L'ajout d'ailettes a produit la solution escomptée, qui était la réduction progressive de la température à mesure que le nombre d'ailettes augmentait. La disposition à 15 ailettes était la plus efficace pour dissiper le flux de chaleur et réduire la température.

Dans une deuxième étude, l'influence du matériau du dissipateur de chaleur a été analysée. On a constaté que le dissipateur de chaleur en graphène présente des performances plus élevée que celle du dissipateur thermique en cuivre et en aluminium, la température du dissipateur thermique diminue comme prévu. Cependant cela rend le dissipateur thermique plus cher et plus lourd.

L'effet de la variation du flux de chaleur a également été étudié. Il a été constaté que le gradient de température est proportionnel au flux thermique, tel que, la température continue d'augmenter avec l'augmentation du flux de chaleur. On peut dire alors que le flux toujours croissant est défavorable à l'amélioration de l'uniformité de la température.

## Conclusion générale

---

Enfin, une étude sur l'impact de la géométrie du dissipateur thermique sur la dissipation de chaleur a été effectuée. Une comparaison entre les performances du dissipateur à ailettes à plaques pleines, perforées et rectangulaire a montré que le microprocesseur est mieux refroidi dans le cas à ailettes perforées et présente les performances thermiques les plus élevées alors que celle du dissipateur à ailettes pleines sont les plus basses. Donc, les dissipateurs thermiques à ailettes perforées offrent des avantages importants dans le refroidissement micro-électronique, en tant que moyen d'obtenir des températures plus faibles pour réduire la consommation d'énergie.

En perspective, et sur la base des résultats obtenus, ce travail peut être continué sur les fronts suivants :

- Une prise en compte des échanges thermiques par rayonnements.
- Une étude d'autres géométries plus complexes comme l'implantation des ailettes broches avec différentes formes entre les ailettes planes, ou encore, la combinaison entre les différentes formes d'ailettes.
- Étude de l'influence d'autres paramètres géométriques tels que la hauteur ou l'ajout de congé ou filet entre les ailettes planes.
- Une étude sur l'effet de l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM) dans le dissipateur thermique.

# Bibliographie

- [1] J.-L. BATTAGLIA, A. KUSIAK, et J.-R. PUIGGALI, Introduction aux transferts thermiques: cours et exercices corrigés, 2e éd. Paris: Dunod, 2014.
- [2] B. DEBICH, « Modélisation, simulation et fiabilité des matériaux à changement de phase pour l'automobile et l'aéronautique », Doctorat, Normandie Université, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03572379/document>
- [3] Laboratoire National De Métrologie et D'essais, « Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques ». [En ligne]. Disponible sur: [https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03\\_proprietes-thermiques-materiaux.pdf](https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03_proprietes-thermiques-materiaux.pdf)
- [4] A. ALLAOUI, « Modélisation thermique des matériaux magnétiques dans les micro-convertisseurs », Doctorat, USTO-MB, 2016. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.univ-usto.dz/theses\\_en\\_ligne/doc\\_num.php?explnum\\_id=1704](http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=1704)
- [5] « Internal Combustion Engine Heat Transfer Outline », engr.colostate.edu. [https://www.engr.colostate.edu/~allan/heat\\_trans/page4/page4f.html](https://www.engr.colostate.edu/~allan/heat_trans/page4/page4f.html)
- [6] « Thermal resistance of a heatsink », fischerelektronik.de. <https://www.fischerelektronik.de/en/service-en/technical-information/thermal-resistance-of-a-heatsink/>
- [7] H. LEE, Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [8] Thermoconcept, « Conductivité thermique ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.thermoconcept-sarl.com/documents/conductivite-thermique/>
- [9] « Caractérisation des flux d'énergie », disciplines.ac-toulouse.fr. [https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii.disciplines.ac-toulouse.fr/files/sti2d/sequences\\_mutualisees/enseignement\\_transversal/seance\\_ett/5.1\\_caracterisation\\_des\\_flux\\_denergie/sti2d\\_ett\\_5.1\\_syn\\_2\\_1ere.pdf](https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii.disciplines.ac-toulouse.fr/files/sti2d/sequences_mutualisees/enseignement_transversal/seance_ett/5.1_caracterisation_des_flux_denergie/sti2d_ett_5.1_syn_2_1ere.pdf)
- [10] N. CONNOR, « Qu'est-ce qu'un coefficient de transfert de chaleur par convection – Définition », thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quun-coefficient-de-transfert-de-chaleur-par-convection-definition/>
- [11] « Propagation de la chaleur ». <https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/eleves/cours/bts-tp-bat/cours.html>
- [12] « Nombres adimensionnels ». <https://hmf.enseiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/2803>

## Bibliographie

---

- [13] P. MARTY, « Transferts thermiques convectifs », 2012. <http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-convection-M2.pdf>
- [14] R. SMITH, H. INOMATA, et C. PETERS, « Supercritical Fluid Science and Technology », Sciencedirect, 2013. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/grashof-number>
- [15] « Introduction to heat transfer : What is Rayleigh Number », Nuclear power. <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/introduction-to-heat-transfer/>
- [16] « Semiconductors », depts.washington.edu. [https://depts.washington.edu/matseed/mse\\_resources/Webpage/semiconductor/semiconductor.htm](https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/semiconductor/semiconductor.htm)
- [17] M. GARIFFO, « Semi-conducteurs : Pour la Maison blanche, 2022 sera synonyme de pénurie », zdnet.fr, 26 janvier 2022. <https://www.zdnet.fr/actualites/semi-conducteurs-pour-la-maison-blanche-2022-sera-synonyme-de-penurie-39936307.htm>
- [18] J.-P. PETIT, « Dissipation thermique dans les systèmes électroniques : Caractéristiques thermiques des composants », Techniques de l'ingénieur, 10 février 2001.
- [19] S. CARSOFF, « Characterization and modeling of passive components and interconnects using microwave techniques », Doctorat, National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics, Tonantzintla, Puebla, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/156/1/SejasGaSC.pdf>
- [20] « Électronique : Semi-conducteurs », Les cours de Claude Gimènès. <https://claude-gimenes.fr/electronique/semi-conducteurs/-vii-tube-a-vide-electronique-ancetre-du-transistor-amplificateur>
- [21] A. A. ALMUBARAK, « The Effects of Heat on Electronic Components », Int. Journal of Engineering Research and Application, p. 52-57, mai 2017.
- [22] « Electronic Equipment Failures: Cause, Effect and Resolution », Innovative Compressed Air Technologies. <https://www.vortec.com/Images/Technical%20Bulletin-130524-Electronic%20Equipment%20Failures-r2.pdf>
- [23] S. VARMA, « Cooling of Electronics : Thermal Management Techniques for Optimal Design », electronicsforu, 19 octobre 2018. <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/thermal-management-techniques-optimal-design>
- [24] Z. ZHANG, « Gestion thermique des composants d'électronique de puissance Utilisation du diamant CVD », Doctorat, Université de Toulouse, 2012. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00835346/document>

## Bibliographie

---

- [25] T. I. N. RASOLOFOMANANA, « Refroidissement d'un dispositif électronique par ailette thermique », Master, Université d'antananarivo, 2016. [En ligne]. Disponible sur: [http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/rasolofomananaTolotraIN\\_ESPA\\_MAST\\_16.pdf](http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/rasolofomananaTolotraIN_ESPA_MAST_16.pdf)
- [26] L. MEYSENC, « Etude des micro-échangeurs intégrés pour le refroidissement des semi-conducteurs de puissance », Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00821096/document>
- [27] S. HERMANN et B. BERGIA, « Test comparatif des différents systèmes de refroidissement informatique s'appliquant au processeur », 2006. [En ligne]. Disponible sur: <http://docplayer.fr/1177882-Test-comparatif-des-differents-systemes-de-refroidissement-informatique-s-appliquant-au-processeur.html>
- [28] H. LOUAHLIA et S. YON, « Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques », NAE-1214-01-R1A. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Etude\\_DissipationThermique.pdf](https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Etude_DissipationThermique.pdf)
- [29] M. TAWK, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Doctorat, Université de Grenoble, 2011. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00586080v2/document>
- [30] P. MARTY, « Le Refroidissement par Jets Fluides : Bilan des Recherches et Applications Récentes ». 2001. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/Jith10\\_32.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/Jith10_32.pdf)
- [31] N. CANEY, J.-A. GRUSS, et M. C. RIOFRIO ALMEIDA, « Étude du spray comme technologie de refroidissement diphasique ». [En ligne]. Disponible sur: [https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres\\_2016/resumes\\_toulouse/132.pdf](https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2016/resumes_toulouse/132.pdf)
- [32] A. LUU, « Méthodologie de prédiction des effets destructifs dus à l'environnement radiatif naturel sur les MOSFETs et IGBTs de puissance », Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00512340/document>
- [33] S. MERGUI, « Transferts thermiques ». [En ligne]. Disponible sur: [http://www.fast.u-psud.fr/~mergui/2A101/cours\\_thermique\\_L2.pdf](http://www.fast.u-psud.fr/~mergui/2A101/cours_thermique_L2.pdf)
- [34] « Conduction à travers une ailette ». [En ligne]. Disponible sur: <http://docs.almohandiss.com/thermo/transfert-de-chaleur/Cours/Conduction-a-travers-une-ailette0.pdf>

## Bibliographie

---

- [35] « Les ailettes ». [En ligne]. Disponible sur: <https://pdfcoffee.com/tp-ailette-pdf-free.html>
- [36] F. MICHEL, « Optimisation des Échangeurs Compacts à Ailettes : Etude Numérique et Expérimentale », Doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2003. [En ligne]. Disponible sur: [https://trioefd.cea.fr/Documents/DOCS%20THESES/These\\_Michel\\_2003.pdf](https://trioefd.cea.fr/Documents/DOCS%20THESES/These_Michel_2003.pdf)
- [37] Y. JANNOT et C. MOYNE, Transferts thermiques: cours et 55 exercices corrigés. Saint-Denis: Édilivre, 2016.
- [38] « COMPLÉMENT (2) : AILETTES ». R. Itterbeek, mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.itterbeek.org/uploads/documents/DynSystCompl2\(Ailettes\).pdf](https://www.itterbeek.org/uploads/documents/DynSystCompl2(Ailettes).pdf)
- [39] « Dissipateur de chaleur », stringfixer. [https://stringfixer.com/fr/Heat\\_sink](https://stringfixer.com/fr/Heat_sink)
- [40] « What is a Heat Sink? » WAKEFIELD THERMOVATIONS. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.newark.com/pdfs/techarticles/wakefield/WhatisaHeatSink.pdf>
- [41] CUI Devices, The Complete Guide To Thermal Management. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cuidevices.com/catalog/resource/the-complete-guide-to-thermal-management-ebook.pdf>
- [42] B. LOEFFLER, « Heat Sinks and Process Cooling », north slope chillers, mars 2020. <https://northslopechillers.com/blog/heat-sinks-and-process-cooling/>
- [43] V. KUMAR, « What Is A Heat Sink? Definition | Types | Materials », rankred, août 2020. <https://www.rankred.com/what-is-a-heat-sink-definition-types-materials/>
- [44] « Heat Sink Types », Celcia. <https://celsiainc.com/technology/heat-sink/>
- [45] S. KRISHNAN, S. V. GARIMELLA, et S. S. KANG, « A novel hybrid heat sink using phase change materials for transient thermal management of electronics », IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., vol. 28, n° 2, p. 281-289, juin 2005, doi: 10.1109/TCAPT.2005.848534.
- [46] « Heat sinks », Engineering360. [https://www.globalspec.com/learnmore/electrical\\_electronic\\_components/fans\\_electronic\\_cooling/heat\\_sinks](https://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/fans_electronic_cooling/heat_sinks)
- [47] « What is a Plate Fin Heat sink? », Radian Thermal Products. <https://www.radianheatsinks.com/plate-fin-heatsink/>
- [48] A. AL-DAMOOK, « Design Optimisation and Analysis of Heat Sinks for Electronic Cooling », Doctorat, University of Leeds, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.whiterose.ac.uk/13427/1/PhD%20Thesis%2C%20Amer%20Al-damook%202016.pdf>

## Bibliographie

---

- [49] G. K. ABRAHAM, « Design and development of an experimental test rig for heat sinks », Master, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1473404/FULLTEXT01.pdf>
- [50] S. NADIRITU, « 6 Factors to Consider for a Better Heat Sink Design », Simscale, janvier 2021. <https://www.simscale.com/blog/2016/10/key-factors-heat-sink-design/>
- [51] S. G. CHAVAN, V. RAI, Y. GOLE, S. DESAI, et N. BADHE, « Heat Transfer Enhancement Techniques in Heat Sink : a Review », bulletin monumental, p. 52, 2020.
- [52] M. SHEIKHOLESAMI, M. GORJI-BANDPY, et D. D. GANJI, « Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices », Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 49, p. 444-469, sept. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.113.
- [53] O. KEKLIKCIOGLU et V. OZCEYHAN, « A Review of Heat Transfer Enhancement Methods Using Coiled Wire and Twisted Tape Inserts », in Heat Transfer - Models, Methods and Applications, K. Volkov, Éd. InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.74516.
- [54] A. A. HUSSAIN, B. FREEGAH, B. S. KHALAF, et H. TOWSYFYAN, « Numerical investigation of heat transfer enhancement in plate-fin heat sinks: Effect of flow direction and fillet profile », Case Stud. Therm. Eng., vol. 13, p. 100388, mars 2019, doi: 10.1016/j.csite.2018.100388.
- [55] Y. YOON, S.-J. PARK, D. R. KIM, et K.-S. LEE, « Thermal performance improvement based on the partial heating position of a heat sink », Int. J. Heat Mass Transf., vol. 124, p. 752-760, sept. 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.080.
- [56] N. S. EFFENDI, S. S. G. R. PUTRA, et K. J. KIM, « Prediction methods for natural convection around hollow hybrid fin heat sinks », Int. J. Therm. Sci., vol. 126, p. 272-280, avr. 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.002.
- [57] H. MOUSAVI, A. A. RABIENATAJ DARZI, M. FARHADI, et M. OMIDI, « A novel heat sink design with interrupted, staggered and capped fins », Int. J. Therm. Sci., vol. 127, p. 312-320, mai 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.02.003.
- [58] M. I. HASAN et H. L. TBENA, « Using of phase change materials to enhance the thermal performance of micro channel heat sink », Eng. Sci. Technol. Int. J., vol. 21, n° 3, p. 517-526, juin 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.03.017.
- [59] A. MAJI, D. BHANJA, et P. K. PATOWARI, « Numerical investigation on heat transfer enhancement of heat sink using perforated pin fins with inline and staggered arrangement »,

## Bibliographie

---

- Appl. Therm. Eng., vol. 125, p. 596-616, oct. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.053.
- [60] D. DENG, G. PI, W. ZHANG, P. WANG, et T. FU, « Numerical Study of Double-Layered Microchannel Heat Sinks with Different Cross-Sectional Shapes », *Entropy*, vol. 21, n° 1, p. 16, déc. 2018, doi: 10.3390/e21010016.
- [61] W. WAN, D. DENG, Q. HUANG, T. ZENG, et Y. HUANG, « Experimental study and optimization of pin fin shapes in flow boiling of micro pin fin heat sinks », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, p. 436-449, mars 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.182.
- [62] I. A. GHANI, N. KAMARUZAMAN, et N. A. C. SIDIK, « Heat transfer augmentation in a microchannel heat sink with sinusoidal cavities and rectangular ribs », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 108, p. 1969-1981, mai 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.046.
- [63] W. AL-SALLAMI, A. AL-DAMOOK, et H. M. THOMPSON, « A numerical investigation of thermal airflows over strip fin heat sinks », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 75, p. 183-191, juill. 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.014.
- [64] B. Li, S. JEON, et C. BYON, « Investigation of natural convection heat transfer around a radial heat sink with a perforated ring », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 97, p. 705-711, juin 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.058.
- [65] L. GONG, J. ZHAO, et S. HUANG, « Numerical study on layout of micro-channel heat sink for thermal management of electronic devices », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 88, p. 480-490, sept. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.048.
- [66] M.-Y. WEN et C.-H. YEH, « Natural convective performance of perforated heat sinks with circular pin fins », *Heat Mass Transf.*, vol. 51, n° 10, p. 1383-1392, oct. 2015, doi: 10.1007/s00231-015-1504-8.
- [67] M. M. TAVAKOL, H. SAADAT, et M. YAGHOUBI, « Numerical analysis of turbulent convection heat transfer from fins with cross perforations », présenté à 15th Conference On Fluid Dynamics, The University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, déc. 2013. Consulté le: 5 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/313477861\\_Numerical\\_analysis\\_of\\_turbulent\\_convection\\_heat\\_transfer\\_from\\_fins\\_with\\_cross\\_perforations](https://www.researchgate.net/publication/313477861_Numerical_analysis_of_turbulent_convection_heat_transfer_from_fins_with_cross_perforations)
- [68] T. ICOZ et M. ARIK, « Light Weight High Performance Thermal Management With Advanced Heat Sinks and Extended Surfaces », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 33, n° 1, p. 161-166, mars 2010, doi: 10.1109/TCAPT.2009.2026736.

## Bibliographie

---

- [69] G. CHEN, J. CAPP, G. GETZ, D. FLAHERTY, et J. NORLEY, « Optimum Design of Heat Sinks Using Non-Isotropic Graphite Composites », in *Heat Transfer: Volume 3*, Las Vegas, Nevada, USA, janv. 2003, p. 489-494. doi: 10.1115/HT2003-47287.
- [70] H. JONSSON et B. MOSHFEGH, « Modeling of the thermal and hydraulic performance of plate fin, strip fin, and pin fin heat sinks-influence of flow bypass », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 24, n° 2, p. 142-149, juin 2001, doi: 10.1109/6144.926376.
- [71] H. E. AHMED, B. H. SALMAN, A. Sh. KHERBEET, et M. I. AHMED, « Optimization of thermal design of heat sinks: A review », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 118, p. 129-153, mars 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.099.
- [72] F. J. do NASCIMENTO, H. L. S. L. LEÃO, et G. RIBATSKI, « An experimental study on flow boiling heat transfer of R134a in a microchannel-based heat sink », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 45, p. 117-127, févr. 2013, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.10.014.
- [73] B. AGOSTINI, J. R. THOME, M. FABBRI, B. MICHEL, D. CALMI, et U. KLOTTER, « High heat flux flow boiling in silicon multi-microchannels – Part I: Heat transfer characteristics of refrigerant R236fa », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, n° 21-22, p. 5400-5414, oct. 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.006.
- [74] K. J. L. GEISLER et A. BAR-COHEN, « Optimization of Pool Boiling Heat Sinks Including the Effects of Confinement in the Interfin Spaces », in *ASME 2007 InterPACK Conference*, Volume 2, Vancouver, British Columbia, Canada, janv. 2007, p. 359-373. doi: 10.1115/IPACK2007-33620.
- [75] M. R. HAJMOHAMMADI, M. BAHRAMI, et M. AHMADIAN-ELMI, « Thermal performance improvement of microchannel heat sinks by utilizing variable cross-section microchannels filled with porous media », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 126, p. 105360, juill. 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105360.
- [76] H. ARASTEH, R. MASHAYEKHI, D. TOGHRAIE, A. KARIMIPOUR, M. BAHIRAEI, et A. RAHBARI, « Optimal arrangements of a heat sink partially filled with multilayered porous media employing hybrid nanofluid », *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 137, n° 3, p. 1045-1058, août 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08007-z.
- [77] H. ZHANG, L. CHEN, Y. LIU, et Y. LI, « Experimental study on heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 56, n° 1-2, p. 172-180, janv. 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.047.
- [78] M. KHAN, S. Z. SHUJA, B. S. YILBAS, et H. AL-QAHTANI, « A case study on innovative design and assessment of a microchannel heat sink with various turbulators

## Bibliographie

---

- arrangements », *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 31, p. 101816, mars 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101816.
- [79] H. E. AHMED, « Optimization of thermal design of ribbed flat-plate fin heat sink », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, p. 1422-1432, juin 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.119.
- [80] C.-C. WANG, K.-S. YANG, Y.-P. LIU, et I. Y. CHEN, « Effect of cannelure fin configuration on compact aircooling heat sink », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, n° 10, p. 1640-1647, juill. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.003.
- [81] G. SUBBUSWAMY et X. LI, « Impinging Jet Cooled Plate Fin Heat Sinks With Turbulators Enhancement », in *Volume 9: Heat Transfer, Fluid Flows, and Thermal Systems, Parts A, B and C*, Lake Buena Vista, Florida, USA, janv. 2009, p. 1447-1455. doi: 10.1115/IMECE2009-12992.
- [82] M. KESHAVARZ MORAVEJI, R. MOHAMMADI ARDEHALI, et A. IJAM, « CFD investigation of nanofluid effects (cooling performance and pressure drop) in mini-channel heat sink », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 40, p. 58-66, janv. 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.021.
- [83] H. R. SEYF et M. FEIZBAKHSI, « Computational analysis of nanofluid effects on convective heat transfer enhancement of micro-pin-fin heat sinks », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 58, p. 168-179, août 2012, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.018.
- [84] H. ZIRAKZADEH, A. MASHAYEKH, H. N. BIDGOLI, et M. ASHJAEI, « Experimental investigation of heat transfer in a novel heat sink by means of alumina nanofluids », *Heat Transf. Res.*, vol. 43, n° 8, p. 709-720, 2012, doi: 10.1615/HeatTransRes.2012004421.
- [85] C. J. HO, L. C. WEI, et Z. W. LI, « An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, n° 2-3, p. 96-103, févr. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.07.003.
- [86] A.-C. IRADUKUNDA, A. VARGAS, D. HUITINK, et D. LOHAN, « Transient thermal performance using phase change material integrated topology optimized heat sinks », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 179, p. 115723, oct. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115723.
- [87] Y. JOO, I. LEE, et S. J. KIM, « Topology optimization of heat sinks in natural convection considering the effect of shape-dependent heat transfer coefficient », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 109, p. 123-133, juin 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.099.

## Bibliographie

---

- [88] E. M. DEDE, S. N. JOSHI, et F. ZHOU, « Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink », in Volume 3: Advanced Fabrication and Manufacturing; Emerging Technology Frontiers; Energy, Health and Water- Applications of Nano-, Micro- and Mini-Scale Devices; MEMS and NEMS; Technology Update Talks; Thermal Management Using Micro Channels, Jets, Sprays, San Francisco, California, USA, juill. 2015, p. V003T03A001. doi: 10.1115/IPACK2015-48027.
- [89] Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus: Interactive Edition. 2008.
- [90] O. ANSART, F. AVRILLAS, E. KREMER, I. NIANG, et K. ZANNIR, « Apprentissage du crash sur Abaqus ». 2005. Consulté le: 20 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: [http://perso.univ-lemans.fr/~fcalvay/projetsmnr/v/model\\_crash\\_abaqus.htm](http://perso.univ-lemans.fr/~fcalvay/projetsmnr/v/model_crash_abaqus.htm)
- [91] O. HERVÉ, « Méthode des éléments finis ». Engineering school. Ecole Centrale de Nantes, 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://cel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/341772/filename/MEF.pdf>
- [92] M. AMIRAT et M. A. BELOUFA, « Cours et applications de la methode des éléments finis ». 2021.