الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Théme

Etude numérique sur les performances des dissipateurs de chaleur pour la gestion thermique des composants électroniques

Présenté et soutenu publiquement par :

HAKKOUM Ahmed & LAKEHAL Ahmed Abdelillah

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr ADJLOUA A	**MCA**	IMSI/UNIV. ORAN 2	**Président**
Mr BOUHAFS Mohamed	**MCA**	IMSI/UNIV. ORAN 2	**Examinateur**
Mr BOUHAMRI Noureddine	**MCA**	IMSI/UNIV. ORAN 2	**Encadrant**

Année 2023/2024

Remerciement

C'est merveilleux de voir ma reconnaissance envers **Allah** pour m'a donné la volonté et le courage nécessaires pour accomplir ce modeste travail. Reconnaître l'aide divine dans nos réalisations est une belle expression de gratitude.

Chers parents,

Je tiens à prendre un moment pour vous exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien inconditionnel tout au long de mon parcours d'études et la rédaction de ce mémoire. Votre amour, votre encouragement constant et votre dévouement ont été des éléments essentiels qui m'ont permis d'atteindre mes objectifs académiques.

Encadrant,

Je tiens à remercier, **[Mr BOUHAMRI Noureddine],** Je tiens par la présente à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour votre précieuse contribution à la réalisation de mon mémoire. Votre soutien inestimable et votre expertise ont été d'une aide cruciale tout au long de ce parcours académique, et je suis extrêmement reconnaissant(e) de pouvoir compter sur vous.

Mes sincères remerciements à Mlle **DJELLID Ikram** pour son aide précieuse.

Nomenclature

Abréviations :

MC	Microcanal
MCHS	Dissipateur thermique à microcanaux
MEPCM	PCM microencapsulé
PCM	Matériau à changement de phase

Liste des symboles :

A_b	Superficie de la base du MCHS (m^2)
H	Hauteur du dissipateur thermique (m)
H_p	Hauteur de la couche PCM (m)
H_c	Hauteur du canal (m)
H_t	L'épaisseur entre les microcanaux et la couche PCM (m)
L	Longueur du dissipateur thermique (m)
W	Largeur du dissipateur thermique (m)
W_p	Largeur de la couche PCM ((m)
W_c	Largeur du canal (m)
W_t	Écart entre les microcanaux (m)
t_1	Épaisseur de la nervure supérieure du dissipateur thermique (m)
t_2	Épaisseur de la nervure inférieure du dissipateur thermique (m)
Dh	Le diamètre hydraulique (m)
C_p	La chaleur spécifique à pression constante (J/(kg.K)).
h	Le coefficient d'échange ($W/m^2.K$)

$\bar{h}$	Coefficient d'échange convectif moyenne $(W/m^2.K)$
K	La conductivité thermique (W/ (m.K)).
K_f	La conductivité du fluide (W/ (m.K)).
$\dot{m}$	Débit massique (kg/s)
Q	le flux de chaleur échangée par convection (W)
q_c	Flux de chaleur appliqué à la surface inférieure en (W/m^2).
R_{th}	La résistance thermique moyenne du dissipateur thermique (K/W)
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)
T	Température (K).
T_0	Température d'entrée (K)
T_p	La température des parois (k)
T_f	Température du fluide (K)
T_{out}	Température moyenne du fluide à la sortie (K)
$\overline{T}_m$	Température moyenne de mélange basé sur la masse volumique (K)
T_w	Température moyenne de la surface d'échange (K)
T_{min}	Température minimale du dissipateur thermique surface inférieure (K)
T_{max}	Température maximale du dissipateur thermique surface fond (K)
$\overline{T}_b$	Température moyenne de la surface inférieure du MCHS (K)
TUC	Le coefficient d'uniformité de la température
U_0	la vitesse de l'écoulement à l'entrée (m/s)
F_i	Représente les forces de volume suivant la direction i
ρ	la masse volumique du fluide (kg/m^3)
V_f	le volume total du fluide à l'intérieur du canal (m^3)
A_f	la surface mouillée
V	Le volume du composant électronique (m^3).
u, v, w	Composante du vecteur vitesse suivant x, y, z (m)
x, y, z	Cordonnées cartésiennes

Symboles grecs :

β	Le coefficient de dilabilité ou d'expansion thermique (1/K)
μ	La viscosité respectivement dynamique (Pa. s)
α	La diffusivité thermique (m^2/s).
φ	La fraction volumique des particules
Φ	Flux de chaleur transmis par convection (W).
λ	Conductivité thermique du milieu ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
σ	Constante de Stefan ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
ρ	La masse volumique (kg/m^3)
ν	La viscosité cinématique (m^2/s)
ϵ	Facteur d'émission de la surface

Nombres adimensionnels :

$$Re = \frac{\rho u_0 Dh}{\mu}$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} Dh}{K_f}$$

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction général

Chapitre I : Généralité sur les dissipateurs de chaleurs et l'état de l'art

I. Introduction **1**

I.1.Généralités **1**

I.2.Transfert de chaleur **2**

I.2.1.Mode de transfert de chaleur **2**

I.2.1.1.La conduction **2**

I.2.1.2. La convection **2**

I.2.1.3. Le rayonnement **3**

I .3.1. La surchauffe des composants électronique **3**

1.3.2. Les causes de surchauffes des composants électroniques **3**

a-Problème de conception et d'ingénierie **3**

b- les facteurs environnementaux **3**

I.4.Les technique de refroidissement des composants électroniques **4**

I.4.1. Refroidissement par air **4**

I.4.2. Refroidissement par carneaux **5**

1.5.1. Les dissipateurs thermiques (Heath SINK) **6**

1.5.2. Critère de choix d'un dissipateur **6**

1.5.3. Les différents types de dissipateur **7**

1.5.3.1. Dissipateur thermiques passif **7**

I.5.3.2. Type de dissipateur passif **7**

I.5.3.3. Dissipateur thermique actif **8**

I.5.3.4. Type de dissipateur actif **8**

I.6.1. Changement de phase de matériel (PCM) **9**

I.6.2. Les type de PCM **9**

I.7. État de l'art **9**

I.7.1. En 2015 **9**

I.7.2 .En 2015 **11**

I.7.3.En 2016 **12**

I.7.4.En 2017 **13**

I.7.5.En 2018 **14**

I.7.6.En2019 **14**

I.7.7.En 2020 **16**

I.7.8.En 2021 **17**

I.7.9.En 2022 **18**

I.7.10.En2023 **19**

I.7.11.En 2024 **20**

I.8.Conclusion **21**

Chapitre II Notions sur les écoulements et Formulation Mathématique

II.1. Introduction **23**

II.2 Introduction sur la Convection **23**

II.2.1 Convection forcé **23**

II.3Présentation de la méthode de résolution mathématique **24**

II.3.1Méthode des Différences Finis (MDF) **24**

II.3.2Méthode des Volumes Finis (MVF) **25**

II.3.3Méthode des Eléments Finis (MEF) **26**

II.3.3.1Domaine d'application de la MEF **27**

III.3.3.2 Les avantages et les inconvénients de la MEF **28**

III.3.3.4Étapes du calcul par la Méthode des Eléments Finis (MEF) **29**

II.4 Régime d'écoulement **29**

II.5 Eléments mathématiques de base (équations gouvernantes) **31**

II.5.1 L'équation de continuité **31**

II.5.3 L'équation de l'énergie **32**

II.5.2 Les équations de quantité de mouvement **32**

II.6 Les hypothèses de l'écoulement dans les micro canaux **33**

II.6.1 Equations dimensionnelles **34**

II.7 Les nombres sans dimensions **35**

II.8 Calcul des grandeurs Hydrodynamique et Thermique **36**

II.9Conclusion **38**

Chapitre III Résultats et discussion

III.1.Introduction **39**

III.2.Géométrie de notre étude **39**

III.2.1. Description du problème **39**

III.2.2. Les conditions aux limites **40**

III.3.Maillage **41**

III.3.1. Choix du maillage **41**

III.3.2. Test de convergence **41**

III.4. Sensibilité du maillage **42**

III.4.1.Résultats de maillage **43**

III.5. Validation Des résultats **44**

III.6. Résultats et discussion **47**

III.6.1Etude du profil de température **47**

III.7.Cas étudié **49**

III.7.1.Dissipateur a micro-canaux forme rectangulaire **49**

III.7.1.1 Résultats **49**

III.7.1.1 Etude du profil de température **49**

III.8.Dissipateur thermique MCHS avec ailettes **51**

III.8.1. Résultats **52**

III.8.1.Etude du profil de température **52**

III.9.Dissipateur thermique avec PCM paraffine **54**

III.9.1. Résultats **54**

III.9.1.1. Etude du profil de température **54**

III.10.Dissipateur thermique à PCM n-eicosane **56**

III.10.1.Résultats **57**

III.10.1.1. Etude du profil de température **57**

III.11. Comparaison entre les deux PCM **59**

III.12.Conclusion **61**

Conclusion général

Bibliographique

Liste des figures

Figure -I1-Transfert thermique entre T1 et T2 **2**

Figure-I2- Schéma de convection **3**

Figure -I3- Transfert par rayonement **3**

Figure -I4- convection a air forcé et naturelle **5**

Figure-I5-refroidissement par des carneaux **6**

Figure -I6- Dissipateur passif **7**

Figure -I7-Dissipateur actif **8**

Figure -I8- MCHS monocouche **10**

Figure-I9- Graphe de résistance thermique par rapport de nombre des canaux **11**

Figure -110- MCHS avec NEPCM 2015 **11**

Figure-I11- dissipateur MCHS zigzag. **12**

Figure -I12- MCHS avec PCM 2017 **13**

Figure-I13- graph de Nu par rapport au porosité **13**

Figure-I14- MCHS avec des nervures triangulaires 2018 **14**

Figure-I15- MCHS ondulé avec nano fluide eau-argent **15**

Figure-I16- MCHS avec un PCM de n-eicosane **16**

Figure-I17-MCHS avec PCM de n-eicosane **16**

Figure-18-schéma de dissipateur avec PCM **17**

Figure-119-position des PCM utilisé dans le dissipateur **18**

Figure-I20-MCHS deux couche **18**

Figure –I21-les quatre model de MMCHS **19**

Figure-I22- dissipateur à double couche **20**

Figure -II1-Situations de convection forcée (a) et de convection naturelle(b) **22**

Figure- II2- Exemple d'écoulement laminaire et intermédiaire et turbulent **30**

Figure -III1- Geométrie étudie **40**

Figure III.2 ***:*** *Les différentes formes de maillage des éléments* **41**

Figure -III.3- Test de convergence **42**

Figure-III4- Maillage grossier **42**

Figure-III5-Maillage normale **42**

Figure-III6-Maillage fine **43**

Figure-III7- Optimisation du maillage Résistance thermique par rapport le flux dans les trois type de maillage **44**

Figure-III8-Géométrie étudié **45**

Figure-III9-Validation de résultats de température moyenne en bas de MCHS **45**

Figure-III10-Validation de résultats de température moyenne de MCHS complet **46**

Figure-III11-Validation des résultats de résistance thermique par rapport le flux **46**

Figure –III12-Distribution de température aux longs de dissipateur MCHS **47**

Figure-III13-Courbe de résistance thermique en fonction de flux de MCHS **48**

Figure-III14-Courbe de température moyenne en bas et complet de MCHS en fonction sa longueur **48**

Figure-III15-Géométrie MCHS à micro-canaux rectangulaires **49**

Figure-III16-Distribution de température au long de MCHS rectangulaire **50**

Figure-III17- Courbe de température moyenne en bas et complet de MCHS rectangulaires en fonction sa longueur **50**

Figure-III18-Courbe de résistance thermique en fonction de flux de MCHS rectangulaires **51**

Figure-III19-Géométrie de MCHS à ailette **52**

Figure-III20-Distribution de température aux longs de MCHS à ailette **52**

Figure-III21-Courbe de température moyenne en bas et complet d'un dissipateur à ailette **53**

Figure-III22-Courbe de résistance thermique en fonction le flux de MCHS à ailette **53**

Figure-III23-Géométrie de MCHS avec PCM paraffine **54**

Figure-III24-Distribution de température aux longs de dissipateur avec PCM paraffine **55**

*Figure-III25- Courbe de température moyenne en bas et complet de MCHS à paraffi*ne **55**

Figure-III26-résistance thermique de PCM paraffine **56**

Figure-III27-Géométrie n-eicosane **57**

Figure-III28-Distribution de température aux longs de MCHS avec PCM **57**

Figure-III29-Courbe de température en bas complet de PCM n-eicosane **58**

Figure-III30-Résistance thermique de PCM n-eicosane **58**

Figure-III31-Comparaissent de résistance thermique en fonction de flux entre paraffine et n-eicosane **59**

Figure-III32-Comparaissent de température moyenne en bas de paraffine et n-eicosan en fonction de ces longueurs **60**

Figure-III33-Comparaissent de température moyenne complète de paraffine et n-eicosan en fonction de ces longueurs **60**

Liste des tableaux

Tableau-III1- Les résultat de maillage **43**

Résumé

Les dissipateurs thermiques jouent un rôle crucial dans la gestion thermique des systèmes énergétiques et des dispositifs électroniques modernes. Cependant, la miniaturisation et les besoins en puissance élevés de ces équipements entraînent une augmentation de la chaleur générée. Ainsi, il est essentiel d'avoir un système de gestion thermique efficace pour assurer le bon fonctionnement de ces équipements. Les micro-canaux de dissipateurs thermiques (MCHS) sont privilégiés en raison de leur compacité et de leur capacité de dissipation thermique élevée. Les chercheurs se concentrent sur l'amélioration des performances des MCHS.

Cette étude évalue les performances de refroidissement de quatre types de dissipateurs de chaleur à micro-canaux : rectangulaire, avec ailettes, avec PCM paraffine et avec PCM n-eicosane. Les performances sont mesurées en termes de résistance thermique et de température moyenne. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL, qui permet la modélisation et la simulation multiphysique. Les résultats obtenus permettent de comparer les différentes configurations de refroidissement pour déterminer la plus performante.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de comparer les performances de refroidissement des différentes configurations de dissipateurs de chaleur afin d'optimiser leur conception et améliorer leur efficacité de refroidissement dans diverses applications.

Mots clés : Dissipateur thermique à micro canaux. Refroidissement électronique. Matériau à changement de phase (PCM) .Gestion thermique. Résistance thermique.

الملخص

تلعب الحواجز الحرارية دورًا حاسمًا في إدارة الحرارة في أنظمة الطاقة والأجهزة الإلكترونية الحديثة. ومع ذلك، يتسبب التصغير والاحتياجات العالية للطاقة في هذه الأجهزة في زيادة في توليد الحرارة. لذا، من الضروري أن يكون هناك نظام إدارة حرارية فعال لضمان التشغيل السليم لهذه الأجهزة. تعتبر الأنابيب الدقيقة للحواجز الحرارية (MCHS) مفضلة بسبب صغر حجمها وقدرتها العالية على التبريد. يركز الباحثون على تحسين أداء MCHS.

تقوم هذه الدراسة بتقييم أداء تبريد أربعة أنواع من الأنابيب الدقيقة للحرارة: الأنابيب ذات الشكل المستطيل، والأنابيب ذات الزعانف الاسطوانية الصلبة، والأنابيب ذات المواد المتغيرة (PCM) بارافين، والأنابيب ذات المواد المتغيرة (PCM) ن-ايكوسان. يتم قياس الأداء من خلال المقاومة الحرارية ودرجة الحرارة المتوسطة. تم إجراء المحاكاة العددية باستخدام

برنامج COMSOL الذي يتيح نمذجة ومحاكاة متعددة الفيزياء. تتيح النتائج المحصلة على مقارنة التكوينات المختلفة للتبريد وتحديد الأفضل أداءً.
الهدف من هذه الدراسة هو تحليل ومقارنة أداء تبريد التكوينات المختلفة للأنابيب الدقيقة للحرارة من أجل تحسين تصميمها وزيادة كفاءتها في التبريد في تطبيقات متنوعة.

الكلمات المفتاحية : مبدد حراري بقنوات صغيرة، تبريد الكتروني، مادة بتغيير المرحلة(PCM) ، إدارة الحرارة،مقاومة حرارية، أداء حراري.

Abstract

Thermal dissipators play a crucial role in the thermal management of energy systems and modern electronic devices. However, the miniaturization and high power requirements of these equipment lead to an increase in generated heat. Thus, it is essential to have an efficient thermal management system to ensure the proper functioning of these equipment. Microchannel heat sinks (MCHS) are favored due to their compactness and high heat dissipation capability. Researchers are focusing on improving the performance of MCHS.

This study evaluates the cooling performance of four types of microchannel heat sinks: rectangular, finned, with paraffin phase change material (PCM), and with n-eicosane PCM. The performance is measured in terms of thermal resistance and average temperature. Numerical simulations were performed using COMSOL software, which enables multiphysics modeling and simulation. The obtained results allow comparing different cooling configurations to determine the most efficient one.

The objective of this study is to analyze and compare the cooling performance of different heat sink configurations to optimize their design and improve their cooling efficiency in various applications.

Keywords: microchannel heat sink .Electronic cooling .Phase change material (PCM). Thermal management. Liquid fraction. Thermal resistance .Thermal performance.

Introduction générale

Dans le nouveau siècle, la technologie est devenue une partie intégrante de nos vies. Parmi les facteurs les plus importants de développement est le système électronique, les processeurs et plusieurs composent électronique. Les scientifiques ont développé ces composants et pièces pour devenir micro-compacte, avec une vitesse de fonctionnement plus rapide et une plus grande consommation d'énergie, ce changement a entraîné une augmentation importante et excessive de la température des pièces par déférents modes de convection (naturelle, forcée et mixte), ce qui peut réduire ou endommager les performances des composants électronique.

La dissipation ou la réduction de la chaleur causée par les processeurs et les composants électroniques est devenue un problème d'étude plus importante de la fabrication et de nouvelle technologie. Les chercheurs et les développeurs ont trouvé de nombreuses façons de disperser cette chaleur, y compris les dissipateurs thermiques des micro-canaux (MCHS) qui se sont avérées être un dispositif de refroidissement à haute performance. En général, les dissipateurs thermiques sont faits d'aluminium ou de cuivre et sont des matériaux à haute conductivité thermique.

La méthode de refroidissement la plus courante pour les composants électroniques est le refroidissement par l'eau. Dans cette étude, nous cherchons à améliorer l'écoulement de l'eau chaud et à réduire la différence de chaleur du dissipateur thermique(MCHS).

L'objectif de cette étude est de dissiper la chaleur du composant électronique (dissipateur) de model MCHS fabriqué en cuivre avec de l'eau circulant dans ces micro-canaux, une simulation a été réalisée à travers le logiciel COMSOL Multiphysics .

- Nous présentons le contenu de ce mémoire en trois chapitres, répartis comme suit :

Chapitre I :(Généralités sur les dissipateurs et état de l'art) : informations sur les dissipateurs thermiques et quelques travaux de chercheurs dans la dernière décennie (2015 à 2024).

Chapitre II : (Notions sur les écoulements et formulation mathématique) : les équations et les relations physiques et mathématique seront présentées.

Chapitre III :(Résultats et discussion) : Une validation a été effectuée avec la littérature. Notre simulation traitée par le logiciel COMCOL Multiphysics sera illustrée avec quelques cas étudiés, ensuite, les résultats trouvés seront interprétés avec soin.

Chapitre I

Généralités sur les dissipateurs de Chaleur & état de l’art

1. Introduction

Dans cet article nous présentons une généralité sur les dissipateurs thermiques avec plusieurs types et leur efficacité sur les composantes électroniques avec une partie quand à présenté quelque travail et les résultats des chercheur dans les dissipateur de puis l'année 2015 jusqu'à 2024.

1 .1.Généralités

Le comportement thermique des appareils électroniques est l'une des caractéristique les plus importantes de leur performance.les taux de défaillance des composants électroniques augments de façon exponentielle avec l'augmentation de la température [1] .

Les dissipateurs thermiques jouent un rôle principal dans la gestion thermique des systèmes énergétiques et des appareils électroniques. La miniaturisation et les exigences de puissance élevées des équipements électroniques modernes les rendent plus compacts et plus générateurs de chaleur. Pour l'efficace pour le fonctionnement d'équipements électroniques modernes, un système de gestion thermique efficace est requis. Dissipateurs thermiques à micro canaux (MCHS) sont le meilleur choix pour une gestion thermique efficace des appareils électroniques en raison de leur grande compacité et de leur grande dissipation thermique .L'attention de la plupart des chercheurs se porte sur l'amélioration des performances du MCHS .Dans le cadre du présent travail, l'augmentation des performances du MCHS en analysé par les micro-canaux. [2]

1.2Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est important dans les technologie de l'industrie pour contrôler la température des machines, des équipements et des processus industriels pour assurer leur fonctionnement efficace et sûr. Les trois principales formes de transfert de chaleur sont le rayonnement, la conduction et la convection. Cependant, dans de nombreuses applications industrielles, la convection est la forme de transfert de chaleur la plus couramment utilisée, notamment pour le refroidissement des processeurs, des composants électroniques, des radiateurs et des échangeurs de chaleur.

1.2.1. Mode de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur contient trois modes

1.2.1.1. La 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 [5].

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 [6]

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

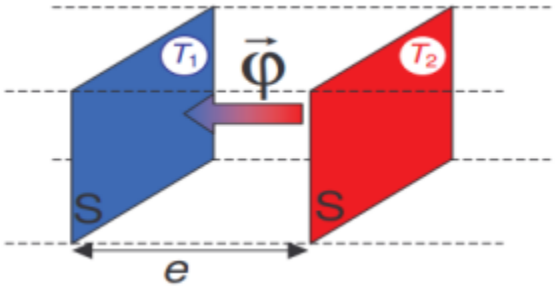

Figure -I1- : Transfert thermique entre T1 et T2

1.2.1.2. La convection

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 [7]

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

$$\Phi = hS(T_s - T_f) \qquad (I2)$$

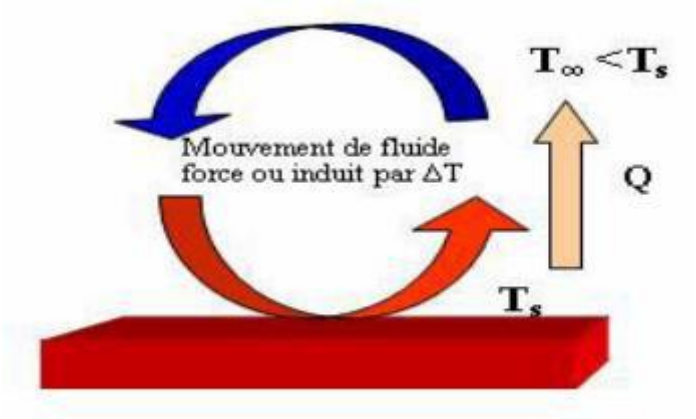

Figure-I2- : Schéma de convection

1.2.1.3. 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].

$$\Phi = \delta . \varepsilon . S . T_4 \qquad (I3)$$

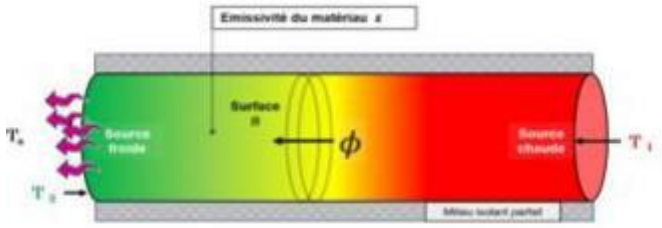

Figure -I3- Transfert par rayonement

1.3.1. le surchauffe des coposants électronique

Le phénomène d'échauffement des composants électronique est caractérisé par le fait que la production de chaleur est plus rapide que sa dissipation. Il en résulte alors une montée

de température du système, une forte élévation de la température peut endommager le composant électronique [8].

1.3.2. Les causes de surchauffes des composants électroniques

a. 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 avec les problèmes de manque de control de qualité pendant la production de composant [9].

b. Les facteurs environnementaux

Les conditions météorologiques fluctuantes ou les différences induites de température ambiante peuvent user et déchirer les composants électroniques. Aussi, l'humidité de l'air ambiant, car la vapeur d'eau peut contaminer les composants métalliques.
Les autres causes de surchauffe sont les mauvais contacts externes et le mauvais câblage qui peuvent entraîné des surtensions excessives et une dissipation de puissance [12].

1.4. Les technique de refroidissement des composants électronique

Pour le bon fonctionnement des composants électronique, il existe plusieurs techniques de refroidissement :

1.4.1. Refroidissement par air

L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur en contact avec le dissipateur thermique par impulsion (convection forcée) ou naturelle [10].

.Convection forcée à air

Le soufflage d'air forcé par un ventilateur est la méthode la plus utilisée pour le refroidissement des composants électronique pour sa simplicité de mise en œuvre [11].

.convection naturelle

Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur dimensionné suivant la surface de refroidissement. Ce dispositif est toujours choisi pour ses

propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium). [10].

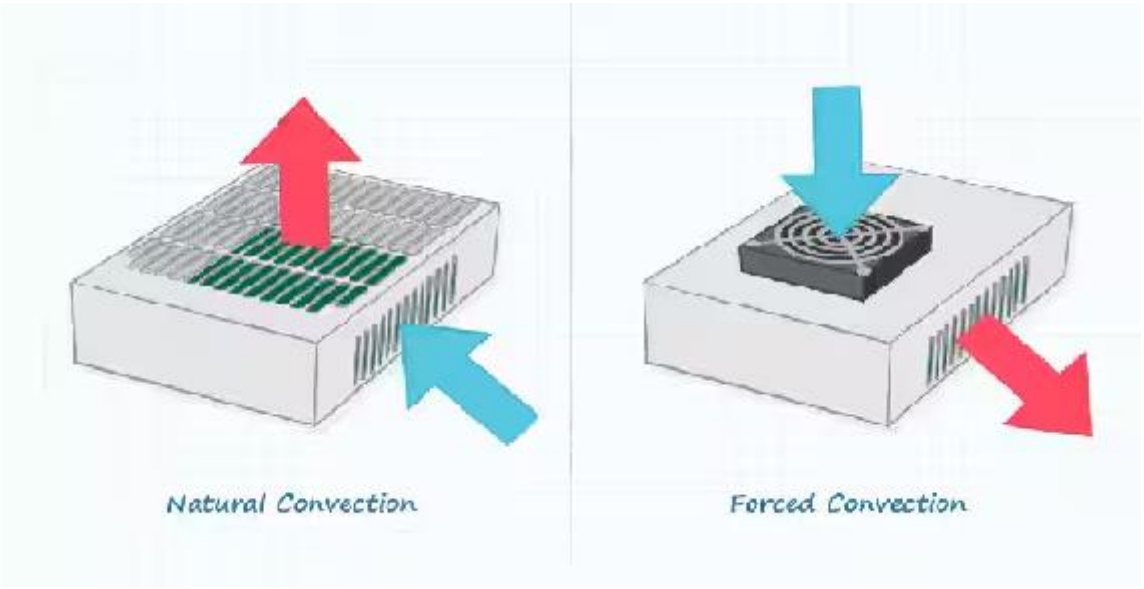

Figure -4- Convection à air forcé et naturelle

1.4.2. Refroidissement par carneaux

Le refroidissement avec la technique des canaux en gestion thermique de l'électronique de puissance peut contribuer à éliminer quelques centaines de flux de chaleur. Mini et micro canal peut se présenter sous une forme plus ou moins complexe selon l'effet recherché et la technologie utilisée [14].

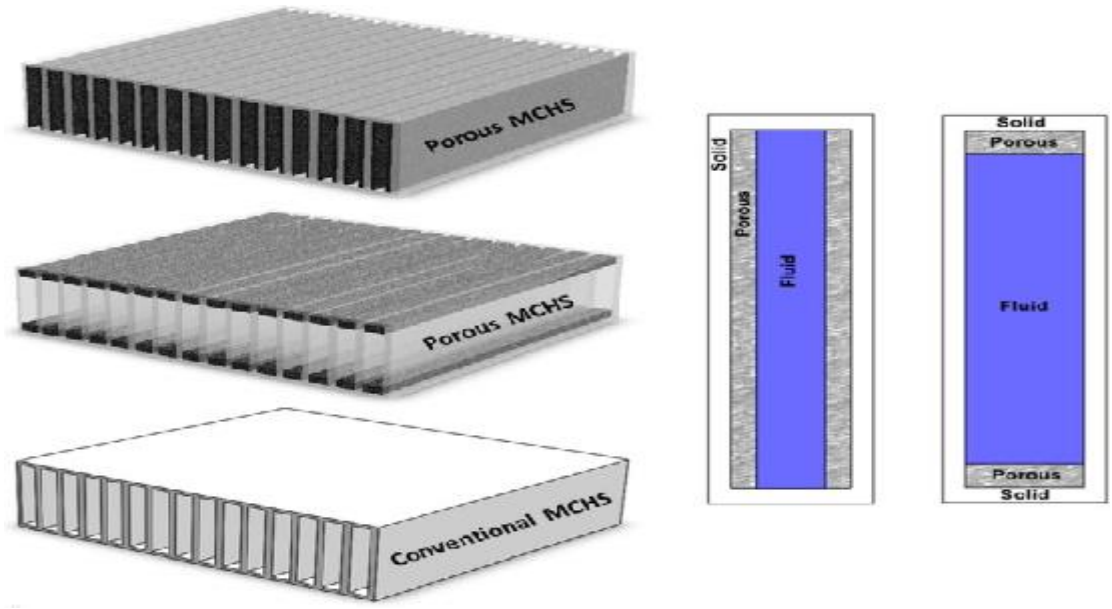

Figure-5-Refroidissement par des carneaux

1.5.1. Les dissipateurs thermiques (Heath SINK)

On dit dissipateur thermique (encore appelé refroidisseur ou radiateur ou heat sinks tout dispositif placé sur un boitier de composant qui a pour rôle de facilité le refroidissement d'un semi-conducteur [3].

Par effet joule, un semi-conducteur est amené à dissiper de la chaleur lorsque ce dernier est parcouru par un courant sous une tension (P=U.I) [3].

L'échauffement par effet joule peut amener la destruction du silicium si la température de composant atteint de valeur trop importante car l'énergie calorifique produite n'est pas correctement évacuée vers l'air ambiant par convection naturelle [3].

Le but du dissipateur est d'augmenter la surface de contact de composant avec l'air ambiant en améliorant ainsi l'évacuation de la chaleur et donc facilitant les échanges thermique [3].

1.5.2. Critère de choix d'un dissipateur

Pour choisir un dissipateur thermique deux critère de choix sont à prendre en compte :

-La forme du dissipateur : il existe des dissipateurs adaptés à chaque forme des composants.

-Sa résistance thermique : elle s'exprime en degrés par Watt en définie les performances thermique du dissipateur, plus elle est petite alors un meilleure dissipateur [3].

1.5.3. Les différents types de dissipateur

Il existe deux grandes catégories de dissipateur thermiques : les dissipateurs thermiques passifs et les dissipateurs actifs [4].

1.5.3.1. Dissipateur thermiques passif

Les dissipateurs thermique passifs dissipent la chaleur par convection naturelle et rayonnement, ils sont généralement constitues d'un matériau à conductivité thermique élevée, comme l'aluminium ou le cuivre, et présentent une grande surface pour maximiser le transfert de chaleur.

Les dissipateurs thermiques passifs sont souvent utilisés dans des applications ou le bruit est un problème, comme les ordinateurs portables et les appareils électroniques, ils peuvent ne pas être suffisants pour refroidir les composants qui génèrent beaucoup de chaleur [4].

Figure -6- Dissipateur passif

1.5.3.2. Type de dissipateur passif

Il existe plusieurs types de dissipateurs thermiques passifs

1. **Dissipateurs thermiques à ailettes** : Ces dissipateurs thermique ont des ailettes qui augmentent leur surface, ce qui améliore le transfert de chaleur.

2. **Dissipateurs thermiques à bloc** : Ces dissipateurs thermiques sont des simples blocs de matériau à conductivité thermique élevée, ils sont souvent utilisés dans des applications ou l'espace est limité [4].
3. **Dissipateurs thermiques à tubes thermiques** : Ces dissipateurs thermiques utilisent des tubes remplis de liquide pour transférer la chaleur d'une zone à une autre [4].

1.5.3.3. Dissipateur thermique actif

Les dissipateurs thermiques actifs utilisent des ventilateurs ou d'autres moyens pour forcer la circulation de l'air autour des ailettes, ce qui améliore le transfert de chaleur. Ils sont plus efficaces que les dissipateurs passifs, mais ils peuvent également être plus bruyants.
Les dissipateurs thermiques actifs sont souvent utilisés dans des applications ou le refroidissement est essentiel, comme les ordinateurs de bureau et les serveurs, utilisé pour refroidir des composants qui génèrent beaucoup de chaleur, comme les cartes graphiques et les processeurs [4].

Figure -7-Dissipateur actif

1.5.3.4. Type de dissipateur actif

Il existe plusieurs types de dissipateurs thermiques actifs :

1. **Dissipateur thermiques ventilés** : Ces dissipateurs thermiques utilisent des ventilateurs pour forcer la circulation de l'air autour des ailettes.
2. **Dissipateur thermique à caloduc** : Ces dissipateurs thermiques utilisent des tubes remplis de liquide pour transférer la chaleur des ailettes vers un dissipateur thermique, ou elle peut être dissipée l'air.

3. **Dissipateur thermique liquides** : Ces dissipateurs thermiques utilisé un liquide, tel que l'eau ou l'huile, pour refroidir le composant .ils sont très efficaces pour dissiper de grandes quantités de chaleur [4].

1.6.1. Changement de phase de matériel (PCM)

Les matériaux à changement de phase (PCM) sont de plus en plus utilisés dans les dissipateurs thermiques pour améliorer le refroidissement des composants électroniques. Ils offrent plusieurs avantages par rapport aux dissipateurs thermiques [13].

1.6.2. Les type de PCM

a-Paraffine : Les paraffines sont les PCM les plus couramment utilisé dans les dissipateurs thermiques en raison de leur faible cout, de leur stabilité chimie.

b-Acides gras : Les acides gras ont une capacité thermique latente élevée et une bonne biodégradabilité, ce qui les rend attrayants pour les applications écologique [13].

c- Polymères : Les polymères à changement de phase sont des matériaux relativement nouveaux qui ont le potentiel de surmonter certaines des limitations des autres types de PCM. Cependant, ils sont encore en cours de développement et ne sont pas encore largement commercialisés.

d- sels hydratés : Les matériaux à changement de phase (PCM) à base de sels hydratés sont une classe de matériaux prometteurs pour le stockage d'énergie thermique en raison de leurs **nombreux avantages [13].**

e-n-eicosane : n-eicosane est un hydrocarbure linéaire composé de 20 atomes de carbone qui absorbé ou libère une grande quantité de chaleur.

1.7. État de l'art

1.7.1. En 2015

Les chercheurs chinois : Lin Lin, Min xin deng, xin xin zhang, xiao dong wang, travaillent sur un dissipateur thermique micro canaux MCHS fabriqué en silicium et l'eau est utilisée comme liquide de refroidissement. Les paramètres de propriété du matériau sont ks = 148 W/km, kl = 0,613 W/km, μ_1 = 0,000855 kg/ms, ρ_1 = 997 kg m^{-3} et cp 1 = 4179 J/ kgK, où k est la conductivité thermique, μ est la viscosité, ρ est la densité et cp est la

chaleur spécifique. Les indices s et l désignent respectivement une nervure solide et un liquide de refroidissement.

Le dissipateur thermique a une dimension de $Lx \times Lz \times Ly = 10 \times 10 \times 0{,}9\ mm^3$. Les paramètres géométriques optimaux pour le MCHS monocouche ont été obtenus dans nos travaux précédents [13]. À des fins de comparaison, les MCHS multicouches actuels adoptent les mêmes paramètres, tels que le numéro de canal $N = 73$, la hauteur totale du canal $Hc = 700.$ µm, largeur de canal de $Wc = 85$ µm et largeur de nervure de $Wr = 26$ µm, avec flux Q=100W/m et Tin=293K et nombre de Reynolds Ré =100-1000. [15]

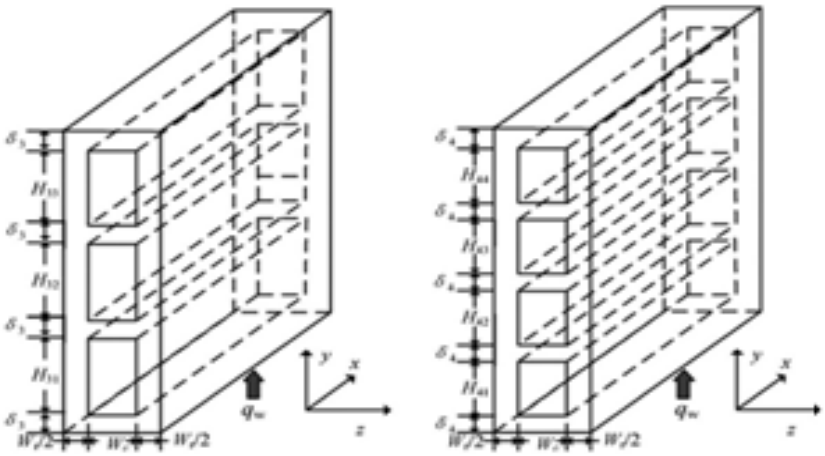

Figure -8- MCHS monocouche

Résultats

Les chercheurs dans cet article ont conclus que quand on prend un nombre de micro canaux, **cela** permit de minimiser la résistance thermique, alors une meilleure dissipation.

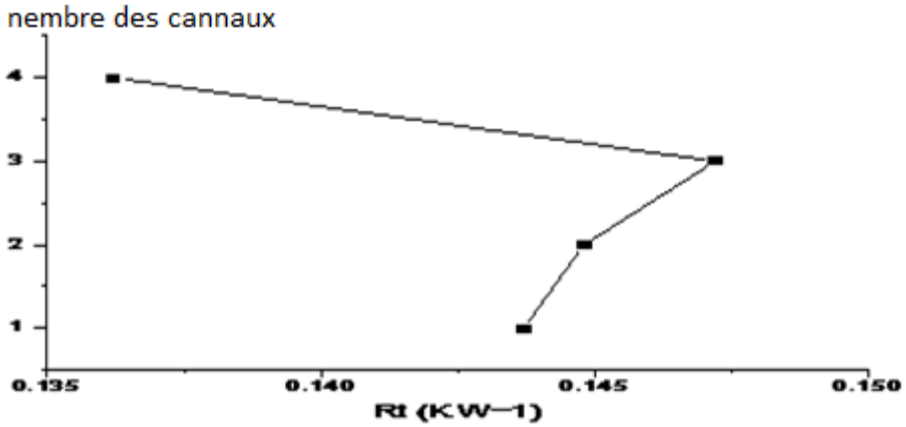

Figure-9- Graphe de résistance thermique par rapport de nombre des canaux

1.7.2 .En 2015

La chercheuse colombienne bahram rajabifar faire une recherche sur un dissipateur thermique MCHS en Al2O3 avec NEPCM en boue de flux Q=70W/cm2 et Tin =296 .15K avec la géométrie de MCHS est, longueur de microchannel =100mm et les deux blocs 50mm et 70mm respectivement [18].

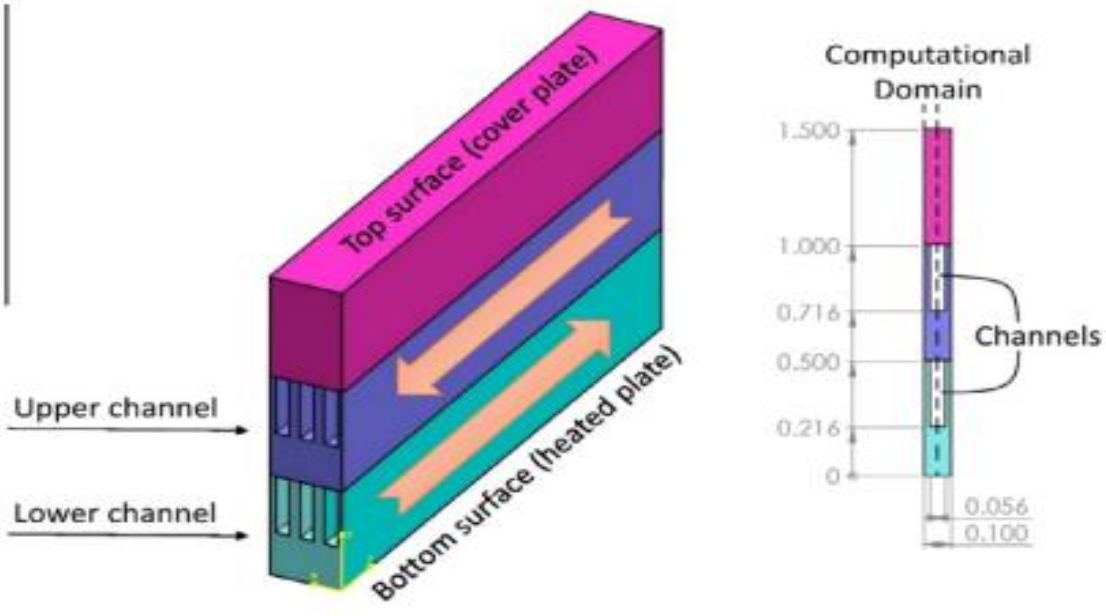

Figure -13- MCHS avec NEPCM 2015

Résultats

Les boues NEPCM peuvent améliorer les performances de refroidissement, Les résultats des simulations menées dans cette étude ont montré que l'emploi simultané de ces deux types de technologie avancées Les liquides de refroidissement dans un dissipateur thermique améliorent les performances de refroidissement du système.

1.7.3. En 2016

Les chercheurs M .khoshvaght-aliabadi et M .sahamiyan ont étudié un dissipateur thermique d'une forme zigzag fabrique en Al2O3 et l'eau circulant dans 2 models, le premier avec une onde de longueur I=20mm et une amplitude de a=1mm et le deuxième avec une longueur d'onde I=20mm et amplitude de a=2mm avec Tin =300K et nombre Reynolds Re=500-4000 [16].

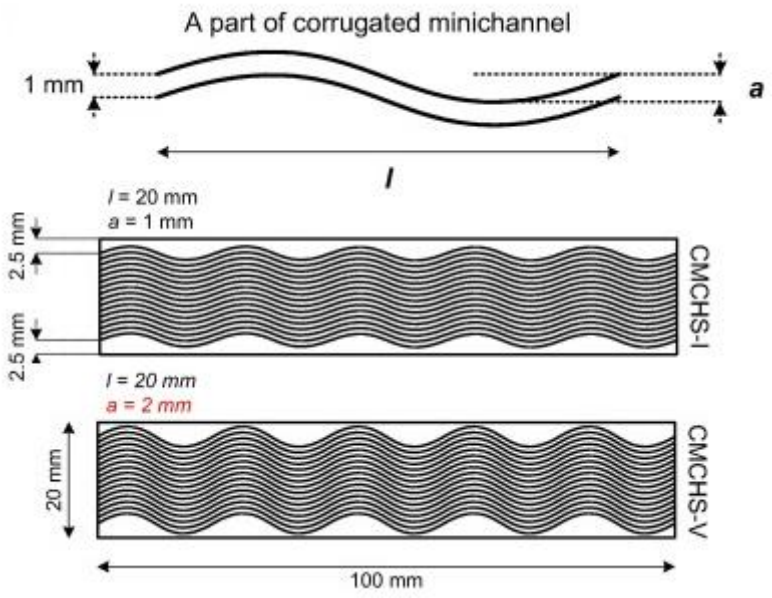

Figure-10- Dissipateur MCHS zigzag

Résultats

Les chercheur ont conclus que la résistance thermique diminue par rapport la longueur et l'amplitude d'onde à mesure que la longueur d'onde diminue et que l'amplitude de l'onde augmente jusqu'à ce qu'ils atteignent une T=303.5K.

1.7.4. En 2017

Les chercheurs chinois Xunjia dend, Shugang wang, Jihong wang, Tengfei zhang travailent sur un dissipateur thermique MCHS fabriqué en aluminium et l'eau circulant avec un PCM en paraffin ,la géométrie de MCHS est :W largeur et L=W=10mm longueur et pour les canaux Wc=0.1mm et H=0.5mm avec X la direction de flux Q=100 W/cm2 et une vitesse d'entré V=1m/s ,Tin=300K .[17]

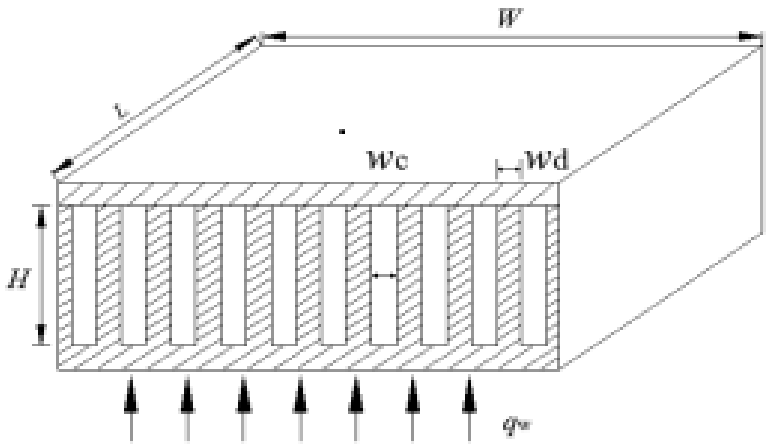

Figure -11- MCHS avec PCM 2017

Résultats

Ils ont trouvés que l'effet de la porosité sur un flux thermique à travers la valeur maximale de Nu (Nusselt) peut être obtenu à partir de la méthode des milieux poreux, et le Nu diminue quand la porosité augmente. Cela signifie que plus les particules MPCM fondent, alors, meilleures sont les performances de transfert de chaleur.

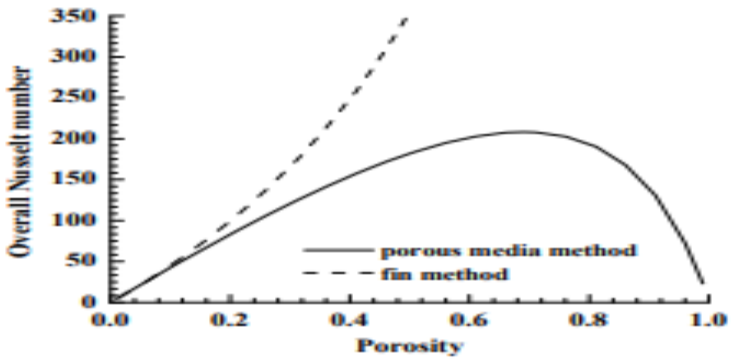

Figure-12- Graph de Nu par rapport au porosité

1.7.5. En 2018

Les trois chercheurs chinois Lei chai , liang wang ,xin bai fabriquent un dissipateur thermique MCHS en silicium et l'eau circulent avec nervures triangulaires sur les parois latérales . Q=10^6 W/m2 , Re=443 , Tin 293K et V1=3m/s et leur géométrique : [19]

Lcom =10mm	Wcom=0 .25mm	Hcom=0.35 mm	Wc=0.1mm
Hc=0.2mm	Wr= 0.1mm	Hr=0.025mm	Wcon=0.07mm

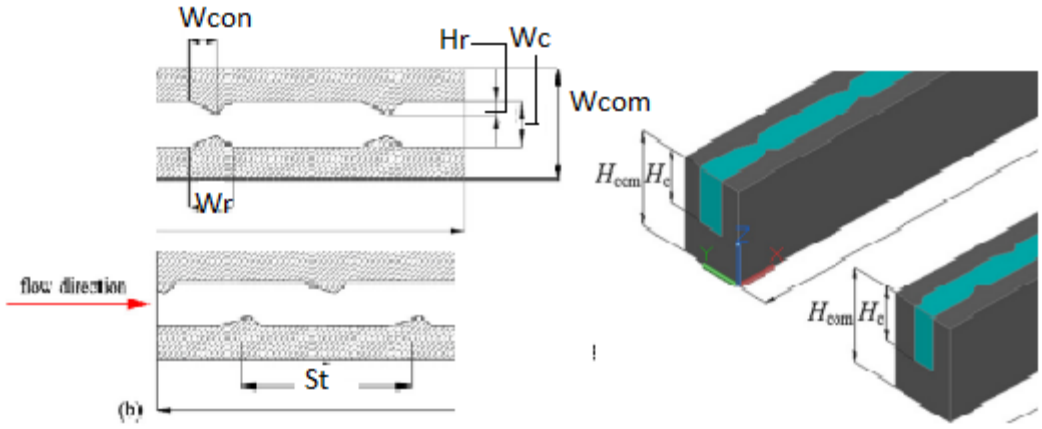

Figure-14- MCHS avec des nervures triangulaires 2018

Résultats

Les dissipateurs thermiques avec des nervures triangulaires sur les parois latérales sont étudiés numériquement permettant à réduire considérablement l'augmentation de la température de la base du dissipateur thermique et le canal convergent-divergent et le canal ondulé peuvent être bénéfiques pour la fiabilité de dissipation.

1 .7.6. En 2019

Les chercheurs Arabies Al-Rasheda , A- Shahsavarb , O-Rasoolib , M.A. Moghimic , A- Karimipourd , M-Duc Tran , construis un dissipateur thermique MCHS ondulé avec un nanofluid eau-argent et de Q=50W/cm2 , Tin=300K .[20]

- Caractérisé par une géométrie :

Lx=15 mm Hc=250 µm

Lz=350 µm Wf =120 µm

Ly=10 mm δ =100 µm

Wc =80 µm

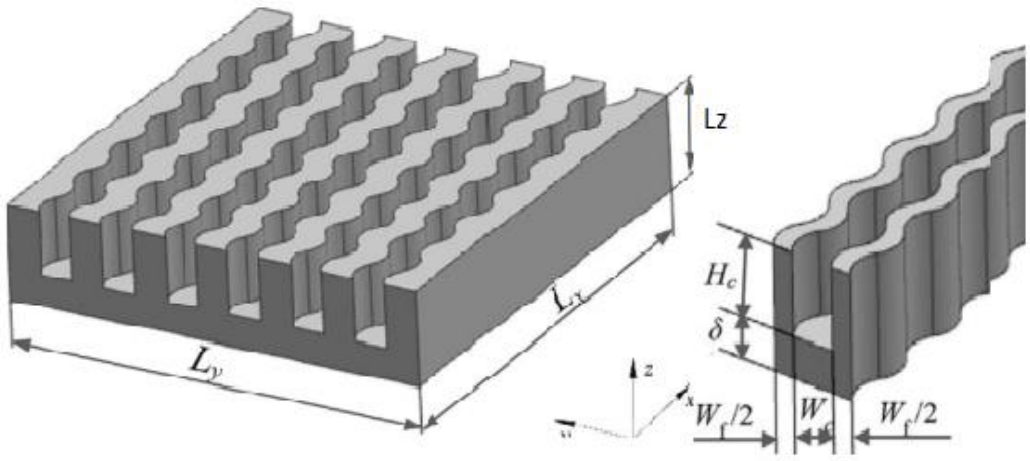

Figure-15- MCHS ondulé avec nanofluide eau-argent

Résultats

L'objectif de cette évaluation numérique est d'évaluer les caractéristiques génératrices d'hydrothermal et d'entropie du nano-fluide, nano-liquide biologique de l'eau-argent à l'intérieur d'un MCHS ondulé.

Le microcannel considéré est situé sur une CPU pour le refroidir. Les simulations sont effectuées pour différentes fractions de volume nano-additif (0, 0,1, 0,5 et 1%), des nombres Reynolds (300, 500, 1000 et 1500), des longueurs d'onde (1, 3 et 5 mm) et des amplitudes d'onde (0, 138, 155 et 300 mm). Initialement, les effets de la fraction de volume nano-additif et du nombre de Reynolds sur la performance des MCHS du premier point de vue de la loi sont examinées et plus tard, les effets de ces paramètres sur la performance de la MCHS sont examinés du deuxième point de vue de la loi et en remarque que le nano-fluide eau-argent avec les ondulations de MCHS jouent un rôle extraordinaire pour la dissipation.

1.7.7. En 2020

Les chercheur W-mon yan , C-j- ho, , Y-u-ting , caiyan-qin fabriquent un dissipateur à micro-canaux en AL2O3-eau circulent avec une étape très développée avec un matériau à changement de phase PCM micro-encapsule ces le N-eicosane avec une T=307.7K et une chaleur latente 24300 J/Kg et Tin= 301K et nombre de Reynolds Re=500-2000 le but de placer le PCM du plafond du mini-canal est destiné à refroidir le fluide en absorbant la chaleur pendant la fusion [21].

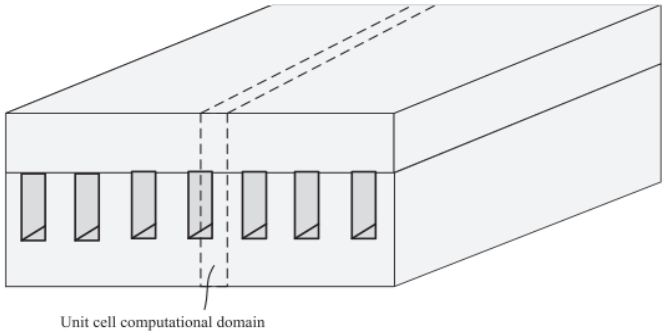

Figure-16- MCHS avec un PCM de n-eicosane

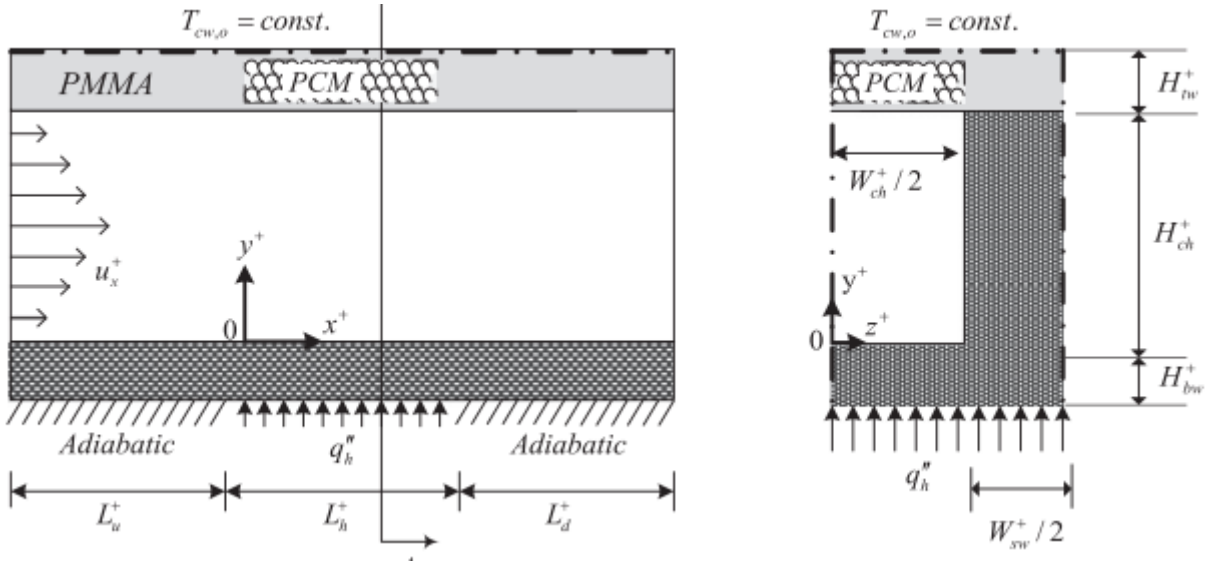

Figure-17-MCHS avec PCM de n-eicosane

Résultats

- L'ajout de nanoparticules Al2O3 au fluide de base augmente, la température du fluide en raison de la conductivité thermique élevée des nanoparticules d'aluminium qui peuvent améliorer les performances thermiques du nano-fluide.

- Pour le fluide de base, nombres de Reynolds de 500, 1000, 1500, 2000, la température du fluide augmente d'environ 34,37%, 32,8%, 33,33%.

- La résistance thermique diminue d'environ 36,54% en augmentant le nombre de Reynolds Re du fluide de base est compris entre 500 et 2 000 à ωnp = 10% et T= 30 °C pour le cas de plafond recouvert de la couche MEPCM. [21]

1.7.8. En 2021

Les chercheurs M-Mozafari, A-Lee .J-Mohammadpour concentrés sur la gestion thermique passive des appareils électronique utilisant des dissipateur thermique intégré avec des ailettes en aluminium utilisé comme amplification de conductivité thermique et une matière de changement de phase unique ou multiple (PCM) RT58 , RT44 et n-eicosane ,trois flux thermique constants de 1.5-2.5 et 3.5 KW/m2 sont appliqué aux dissipateur et une T=301K et un nombre de Reynolds Re=500 [22].

Pour la géométrie : la hauteur =25mm de dissipateur et pour le PCM une épaisseur max=7.3mm et min=6.1mm.

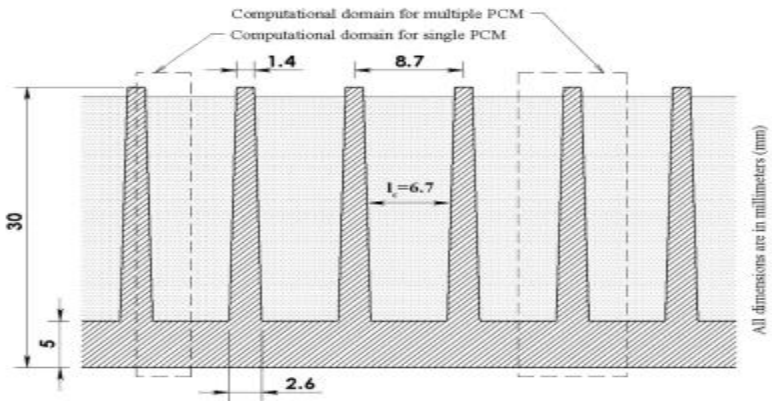

Figure-18-schéma de dissipateur avec PCM

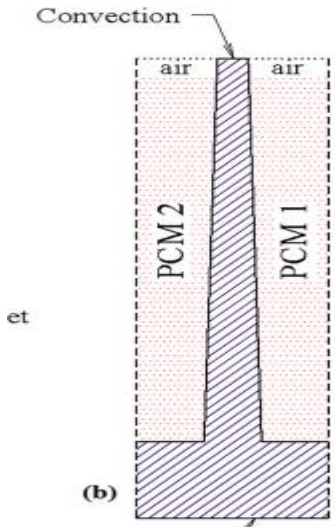

Figure-19-Position des PCM utilisé dans le dissipateur

Résultats

Le chercheurs trouvent que le dissipateur thermique avec les trois matériaux de changement des phases assure la bonne dissipation de chaleur tel que la résistance thermique qui diminue de 10.88% et le nombre de Nusselt augmente, ce qui prouve que la dissipation très fiable.

1.7.9. En 2022

Les deux chercheurs A-Kumar , C-Bokli , fabrique un dissipateur thermique MCHS avec deux couche (DL-MCHS) en différents matériaux, l'aluminium – le silicium – diamant – céramique avec un flux Q=70 W/cm2 et Tin=295.55k et nombre de Reynolds =500 [23].

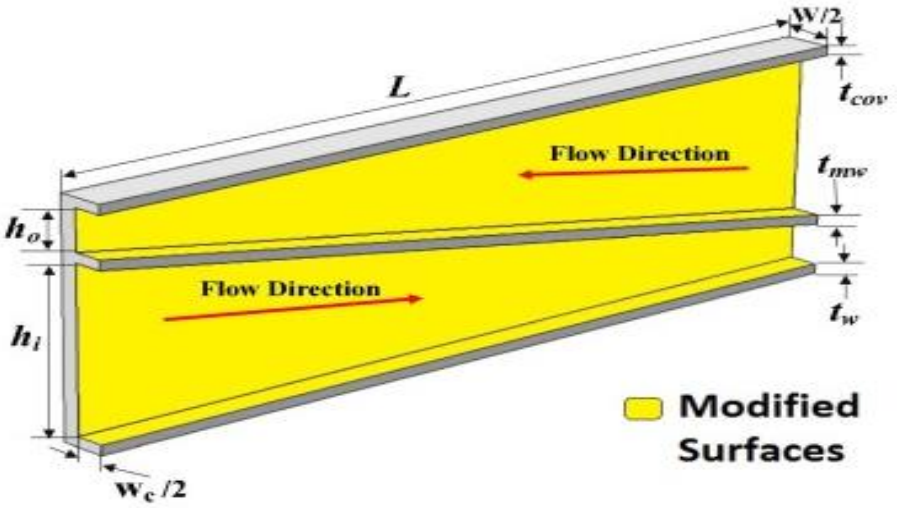

Figure-20-MCHS deux couches

Résultats

Les performances thermo hydrauliques du DL-MCHS ont été étudiées numériquement, améliorant la dissipation thermique par les deux couches, ainsi, la diminution de la résistance thermique.

1.7.10. EN 2023

Les chercheurs F-Naaman Ghadhban, H-Mohammad Jaffal travaillaient sur la configuration de trois dissipateur MMCHS fabriqués en cuivre Cu avec des canaux en forme S ,en forme d'arc et en forme vague avec l'eau circulant dans ces canaux comme un fluide de refroidissement ,pour le débit Q=(0.002 à 0.005 Kg/s) et température Tin =298K et un nombre de Reynolds Re= 224—1121.[24]

La géométrie de MMCHS utilisé est :

L=75mm –longueur

B=50mm—largueur

H=5mm—Hauteur

La géométrie des 7 canaux :

Bc=4mm – largueu

Hc=2mm-- Hauteur

t=2mm—épaisseur des ailettes

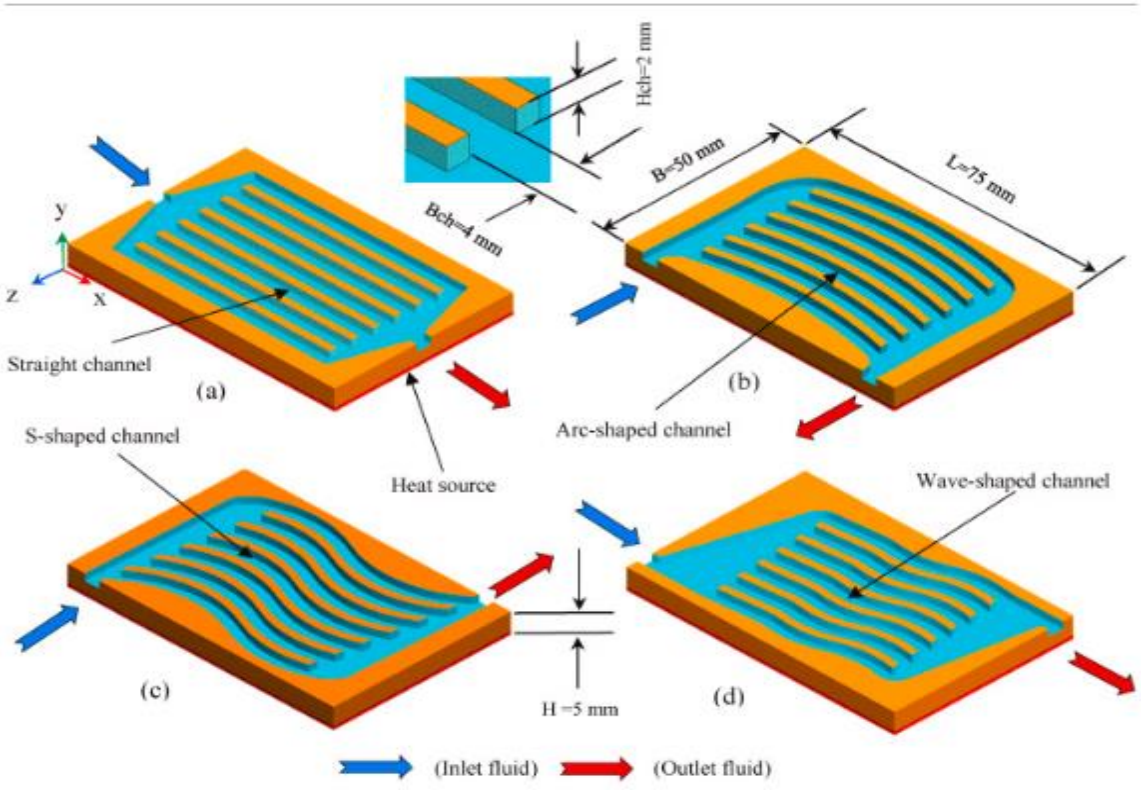

Figure -21-Les quatre modèles de MMCHS

Résultats

Les canaux modifiés sont capables d'améliorer le transfert de chaleur par rapport aux canaux droits, les canaux en vague montraient que l'amélioration très élevée du nombre de Nuselt Nu=30.5% et en (S) Nu=18.7% , en arc Nu = 10.8% .

1.7.11. En 2024

Les chercheurs A-Maheswari, Y-prajapati, P-Bhandari, R-upadhyaya, construits un dissipateur thermique à micro-canaux à double couche en cuivre Cu avec des canaux rectangulaires avec température de fluide entré Tin=303K et un débit Q=100 à 250 ml/min, nombre de Reynolds Re=370 à 950. [25]

La géométrie est :

Hf/Hc=1 et Hf/Hc= 0.75

H=2 mm

H=1.5 – 2 mm

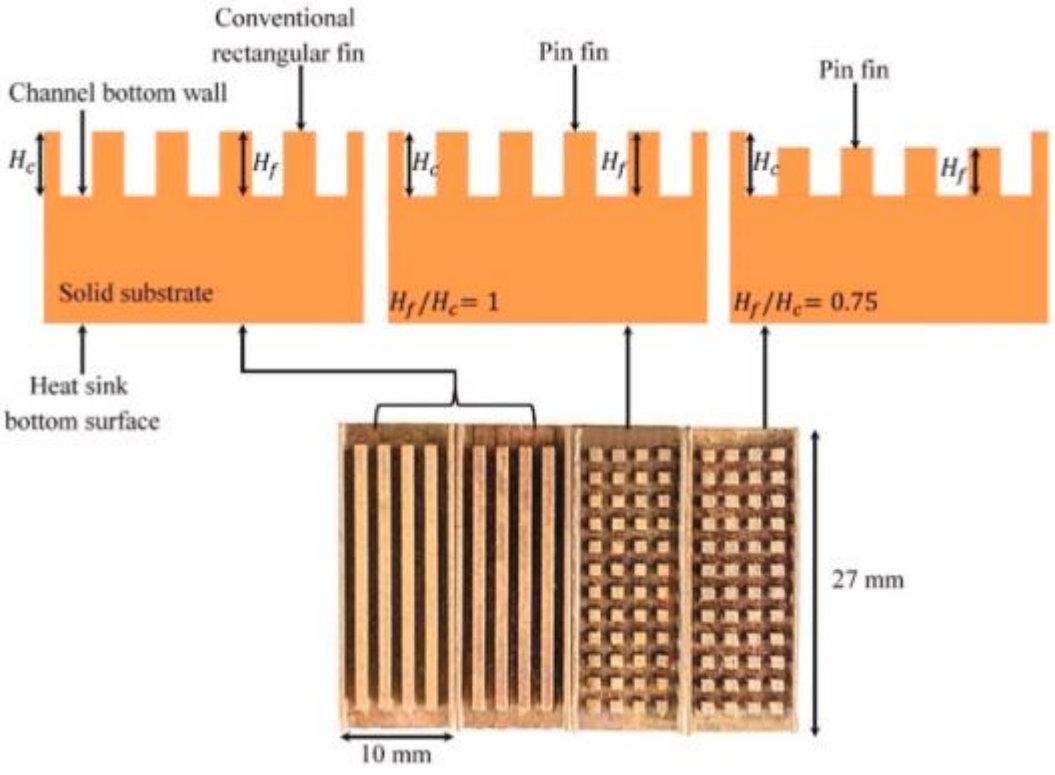

Figure-22- Dissipateur à double couche

Résultats

Dans cette étude les trois configurations différent de DL-MCHS, ils trouvent qu'il y'a une bonne dissipation de chaleur par la comparaison et l'illustration de la chute de pression ΔP.

1.8. Conclusion

Les dissipateur thermique avec de nombreux model est un élément important dans la nouvelle technologie sur tout dans les miniaturisations des éléments électroniques , dans tous les cas, il est important de s'assurer que le dissipateur de chaleur est correctement dimensionné et installé pour garantir une dissipation thermique optimale.

Chaque groupe des chercheurs travaillait pour développer les dissipateurs thermique par plusieurs ajustements, puisqu'ils obtiennent des résultats différents depuis 2015 jusqu'à maintenant.

Par la suite, nous vous présentons l'outil mathématique et les différentes équations qui régissent le transfert thermique.

Chapitre II

Notions sur les écoulements &

Formulation Mathématique

II.1. Introduction

Les transferts thermiques entre les fluides et les parois revêtent une grande importance dans divers domaines tels que la mécanique des fluides, l'énergie solaire, les systèmes d'isolation ainsi que la conception des échangeurs de chaleur.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les équations régissant la convection en régime laminaire, à savoir la conservation de la masse (équation de continuité), la conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes), la conservation de l'énergie pour le fluide et la paroi, ainsi que les conditions aux limites associées à chaque grandeur.

II.2 Introduction sur la Convection

Le transfert de chaleur par convection thermique, ou simplement la convection, représente les processus de transport effectué par le mouvement des fluides. Autrement dit, la convection est l'échange d'énergie, sous forme de chaleur, entre un fluide en mouvement et la surface d'un corps solide ayant une température différente ou entre des parties différentes d'un fluide en mouvemente qui n'ont pas la même température. L'appellation convection a ses racines dans le verbe latin convehere, qui définit l'action de transport d'une place à l'autre.

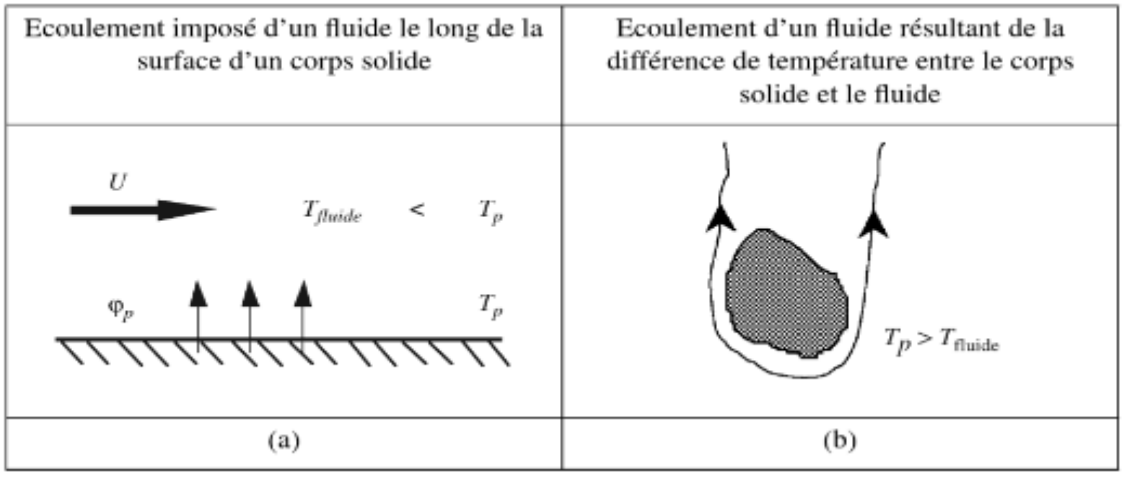

Figure -II1-Situations de convection forcée (a) et de convection naturelle(b).

La convection se situe à l'intersection entre de champs d'étude : le transfert de la chaleur et la mécanique des fluides .Résoudre correctement un problème de convection

nécessite une bonne connaissance de ces deux domaines. On peut considérer deux types de convection forcée et la convection libre ou naturelle. Ceci est illustré sur la figure -II1- [26].

II.2.1 Convection forcé

En particulier, on s'est intéressé au transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide en mouvement qui ont des températures différentes. Une conséquence de l'interaction fluide surface est le développement d'une région dans le fluide dans laquelle la vitesse varie de sa valeur nulle à la surface à la valeur finie de l'écoulement extérieur. Cette région est appelée la couche limite hydrodynamique. De plus, si les températures de la surface et du fluide sont différentes, il y aura aussi une région dans le fluide à travers laquelle la température du fluide variera entre sa valeur à la paroi et celle de l'écoulement externe. Cette région correspond à la couche limite thermique.

À la paroi, la vitesse du fluide est nulle et donc, la chaleur se transmet uniquement par diffusion moléculaire. Ce phénomène perd progressivement de l'importance à mesure que l'on s'éloigne de la surface et c'est le mouvement macroscopique du fluide qui contrôle le processus de transfert. La structure de la couche limite hydrodynamique conditionne le transfert thermique en proche paroi et sa compréhension est la clé de la maîtrise des échanges thermiques par convection forcée.

Le modèle utilisé pour décrire un problème général de convection est connu comme la loi de refroidissement de Newton,

$$Q = hS(T_p - T_f) \tag{II.1}$$

Où Q, le flux de chaleur échangée par convection (W), est proportionnel à la surface d'échanges et à la différence de température entre la surface (T_p) et le fluide (T_f).

La constante de proportionnalité h (W/m^2K) s'appelle coefficient de transfert de chaleur par convection. Il dépend des propriétés de la couche limite, concrètement de la géométrie de la surface, de la vitesse et la nature du mouvement du fluide et de propriétés thermiques du fluide. A partir d'une analyse dimensionnelle des équations de Navier-Stokes pour un écoulement incompressible et un fluide aux propriétés constantes dans la couche limite hydrodynamique et thermique, on obtient une solution pour le coefficient de convection h [27].

II.3Présentation de la méthode de résolution mathématique

La résolution des équations différentielles ou plus généralement des équations aux dérivées partielles occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes [28].

Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulements et de transferts thermiques on peut citer :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des volumes finis.
- La méthode des éléments finis.

Malheureusement, il est pratiquement impossible de trouver une solution analytique et exacte à de tels systèmes du fait que les équations citées précédemment soient très complexes, c'est-à-dire non linéaires d'une part et couplées d'autre part. Dans ce cas, le recours à la résolution numérique s'impose et nous incite à choisir la méthode numérique adéquate pour obtenir les meilleures approximations [29].

II.3.1Méthode des Différences Finis (MDF)

La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherché en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude.

La méthode de différence finie ne permet pas la prise en compte des conditions de passage d'un milieu physique à un autre et des non-linéarités, cela nécessite un traitement

spécifique. D'autre part, elle s'adapte mal aux objets de la géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage [30].

❖ **Les Avantage de la méthode des Différences Finis :**

- grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

❖ **Les Inconvénient de la méthode des Différences Finis :**

- limitation de la géométrie des domaines des calculs (simple, non complexe).
- difficultés de prise en compte des conditions aux limites et en général absence de résultats de majoration d'erreurs [31].

II.3.2Méthode des Volumes Finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P et limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales [30].

1. **les avantages de la méthode du volume finis :**

- Approche très « physique » : bilan des flux.
- S'adapte à une géométrie quelconque.
- Plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires hyperboliques.
- Conservative (par sa formulation).

- La base de tous les codes généraliste en Mécanique des Fluides : Fluent, Star-CD, CFX [32].

2. Les Inconvénient de la méthode du volume finis :

- Complexité d'implémentation.
- Dépendance au maillage.
- Difficulté pour les géométries complexes.
- Traitement des conditions aux limites.
- Précision limitée.

II.3.3Méthode des Eléments Finis (MEF)

Dans la méthode des éléments finis, la continuité de la matière, tel qu'un solide, un liquide ou un gaz, représente un assemblage de subdivisions appelées éléments. Ces éléments sont considérés comme interconnectés au niveau de joints spécifiés appelés noeuds ou points nodaux. Les nœuds se trouvent généralement sur les limites des éléments où les éléments adjacents sont considérés comme connectés. Les fonctions d'approximation (également appelées modèles d'interpolation) sont définies en termes des valeurs des variables de champeaux nœuds. Lorsque les équations de champ (comme les équations d'équilibre) pour l'ensemble du corps sont écrites, les nouvelles inconnues seront les valeurs nodales de la variable de champ. En résolvant les équations aux éléments finis, qui sont généralement sous forme d'équations matricielles, les valeurs nodales de la variable de champ seront connues. Une fois les variables sont déterminées, les fonctions d'approximation définissent la variable de champ tout au long de l'assemblage des éléments. La solution d'un problème général par la méthode des éléments finis suit toujours un processus d’étape par étape.

Étape 1: Divisez la structure en éléments discrets (discrétisation).

La première étape de la méthode des éléments finis consiste à diviser la structure en subdivisions ou éléments. Par conséquent, la structure doit être modélisée avec des éléments finis appropriés. Le nombre, le type, la taille et la disposition des éléments doivent être décidés.

Étape 2: Sélectionnez un modèle d'interpolation ou de déplacement approprié. Etant donné que la solution de déplacement d'une structure complexe dans des conditions de charge spécifiées ne peut pas être prédite avec précision, nous supposons une solution appropriée dans un élément pour approximer la solution inconnue. La solution supposée doit être simple

d'un point de vue informatique, mais elle doit satisfaire à certaines exigences de convergence. En général, la solution ou le modèle d'interpolation est pris sous la forme d'un polynôme.

Étape 3 : Détermination de la matrice de rigidité des éléments et les vecteurs de charge.

Étape 4 : Assemblez les équations des éléments pour obtenir les équations d'équilibre global. Comme la structure est composée de plusieurs éléments finis, les matrices de rigidité des éléments individuels et les vecteurs de charge doivent être assemblés de manière appropriée et les équations d'équilibre global doivent être formulées comme suit:

$$[K]\{U\} = \{F\} \qquad (II.2)$$

U : vecteur d'inconnues (ex : vecteur des déplacements).
K : matrice des constantes (ex : matrice de rigidité).
F: vecteur des chargements (ex : vecteur des forces nodales).

Étape 5 : Résoudre les 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.

Étape 6: Calculez les déformations et les contraintes des éléments. A partir des déplacements nodaux connus ***u***; si nécessaire, les déformations et contraintes des éléments peuvent être calculées en utilisant les équations nécessaires de la mécanique des solides.

Étape 7 : Interpréter les résultats : 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 [33].

III.3.3.1Domaine d'application de la MEF

- Modélisation des structures.
- Analyse linéaire (statique et dynamique).
- Analyse non linéaire (grands déplacements et rotations, grandes déformations, contact et frottement, flambage, ...).
- Mise en forme des matériaux thermique (en régime permanent et transitoire,...).

- Mécanique des fluides.
- Electromagnétisme.
- Dynamique rapide (choc, impact, crash).
- Optimisation des structures [34].

III.3.3.2 Les avantages et les inconvénients de la MEF

La grande souplesse d'adaptation de la MEF à modéliser des phénomènes complexes a conduit à la généralisation de son utilisation dans presque tous les problèmes aux dérivées partielles. Dans la plupart des cas, cette méthode s'intègre aux logiciels CAO (conception assistée par ordinateur). On peut noter les avantages suivants :

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non -linéarités.
- Temps de résolution relativement rentable.

Malgré ça, la mise en œuvre de la MEF est relativement difficile et présente des imprécisions dans ces situations :

- Domaine d'étude infini.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude [35].

III.3.3.4Étapes du calcul par la Méthode des Eléments Finis (MEF)

a) Étapes logiques du calcul par MEF

Définir les nœuds et les propriétés des éléments (Créer le maillage) :

- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$.
- reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux {U} et les forces $\{F_e\}$ appliquées aux nœuds : $[K_e]\{U_e\} = \{F_e\}$
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global. [K] {U} = {F} de manière a satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux Limites.
- Résoudre le système [K] {U} = {F} et obtenir les déplacements {U} aux nœuds.
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont Imposées [35].

b) Etapes pratiques du calcul par EF

1. Pré-processeur :

a. Sélectionner le type d'éléments souhaité.
b. Introduire les caractéristiques géométriques requises.
c. Spécifier les paramètres physiques nécessaires.
d. Élaborer le modèle géométrique correspondant.
e. Effectuer le maillage en définissant les nœuds et les éléments.
f. Appliquer les charges ou les sollicitations requises.
g. Imposer les conditions aux limites appropriées.

2. Solveur :

a. Sélectionner le type d'analyse requis, qu'il s'agisse d'une analyse statique, dynamique, ou autre.
b. Construire les matrices et les vecteurs élémentaires $[K_e]$ et $[f_e]$
c. Assembler les matrices $[K_e]$ et $[f_e]$ pour former les matrices globales [K] et [F].
d. Tenir compte des conditions aux limites spécifiées.
e. Résoudre le système d'équations [K] [U] = [F].
f. Calculer les variations supplémentaires telles que les gradients, les réactions, les contraintes (σ), les déformations (ε), etc.

3. Post-processeur :

1. Présenter les résultats de manière claire et concise, en utilisant des formats numériques et graphiques.
2. Effectuer des fonctions supplémentaires telles que les combinaisons, les interprétations, les interpolations et les animations.

II.4 Régime d'écoulement

La connaissance du régime d'écoulement d'un fluide est un point clé en génie des procédés, car il a une influence sur la plupart des phénomènes, en particulier les transferts de chaleur, de matière, les pertes de charges etc...

Trois grands régimes d'écoulement ont été définis par Reynolds (1883) :

- L'écoulement laminaire : écoulement rectiligne, le fluide s'écoule en filets parallèles à l'axe de la conduite, sans mélange.
- L'écoulement intermédiaire : l'écoulement est plus ou moins rectiligne, avec un peu de mélange (petits tourbillons).
- L'écoulement turbulent : l'écoulement se fait avec de grands tourbillons, avec un mélange important.

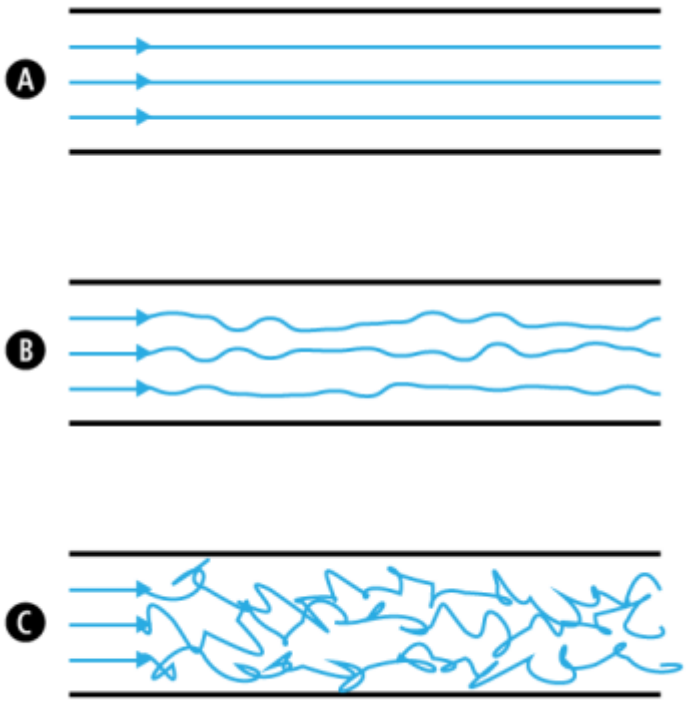

Figure- II2- Exemple d'écoulement laminaire et intermédiaire et turbulent.

A : écoulement laminaire

B : écoulement intermédiaire

C : écoulement turbulent

Le régime d'écoulement dépend du débit de fluide, du diamètre de la conduite et des propriétés du fluide. Il est déterminé grâce au nombre de Reynolds, défini comme suit dans le cas d'un écoulement dans une conduite cylindrique :

- Pour Re<2000, l'écoulement est laminaire.

- Pour 2000<Re<10000, l'écoulement est intermédiaire.
- Pour Re>10000, l'écoulement est turbulent.

II.5 Eléments mathématiques de base (équations gouvernantes)

Effectivement, pour formuler mathématiquement les phénomènes de convection repose sur les équations liant les différents paramètres à savoir : la vitesse, la pression et la température.

Ces équations sont obtenues à partir de :

- La loi de conservation de masse (équation de continuité).
- La loi de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes).
- La loi de conservation d'énergie (équation d'énergie).

II.5.1 L'équation de continuité

L'équation de continuité est une relation fondamentale en mécanique des fluides qui traduit le principe de conservation de la masse dans un écoulement. L'équation s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u j) = 0 \qquad (II.3)$$

(j=1, 2, 3 : indice de sommation)

Pour un fluide Newtonien incompressible, l'équation (II.2) se réduit à :

$$\frac{\partial uj}{\partial xj} = 0 \qquad (II.4)$$

II.5.2 Les équations de quantité de mouvement

Les équations de quantité de mouvement sont des relations fondamentales en mécanique des fluides qui décrivent le bilan des forces agissant sur un fluide. Ces équations sont essentielles pour comprendre les phénomènes d'écoulement et de transfert de quantité de mouvement dans les systèmes fluidiques. L'équation s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho ui) + \frac{\partial(\rho uj\, ui)}{\partial xj} = Fi - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial xj}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial xj} + \frac{\partial uj}{\partial xi}\right)\right] \quad (II.5)$$

Où :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)$: Représente le taux de variation de la quantité de mouvement

$\frac{\partial(\rho uj\, ui)}{\partial xj}$: Représente le taux net de transport de quantité de mouvement suivant la direction i, par mouvement du fluide.

Fi : Représente les forces de volume suivant la direction i.

$\frac{\partial P}{\partial x_i}$: Représente les forces dues à la pression.

$\frac{\partial}{\partial xj}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial xj} + \frac{\partial uj}{\partial xi}\right)\right]$: Représente les forces nettes de viscosité.

L'équation (II.4) représente la conservation de quantité de mouvement (équation de Navier Stokes) d'un fluide visqueux incompressible pour un régime transitoire.

II.5.3 L'équation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\rho Cp\left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[K\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] + q + \mu\Phi \quad (II.6)$$

Où :

K : La conductivité thermique.

$C\rho$: La chaleur spécifique à pression constante.

ρ: La masse volumique.

q : Puissance volumique dissipée.

μ : Viscosité dynamique du fluide.

Φ: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

II.6 Les hypothèses de l'écoulement dans les microcanaux

La modélisation du système étudie est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. L'écoulement est stationnaire et tridimensionnel.
2. Le régime est laminaire
3. Le nano fluide est Newtonien et incompressible.
4. La puissance volumique dissipée est négligeable.
5. Le flux de la source de chaleur est constant dans le temps.
6. Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable ainsi que le transfert de masse.
7. Les propriétés thermo physiques du nano fluide (K, Cp, μ, ρ) sont constantes.
8. La dissipation visqueuse est négligeable.
9. La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température.

Cette variation est donnée par la relation :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \qquad (II.7)$$

T : Représente la température du fluide en un point donné du système.

T_0: La température de référence.

ρ_0: La masse volumique du fluide.

β : Le coefficient d'expansion volumique thermique du fluide, il est donné par :

$$\rho = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)p \qquad (II.8)$$

On utilise une hypothèse simplificatrice connue par l'hypothèse de Boussinesq, qu'elle dit : « la masse volumique du fluide est supposée constante dans les équations hydrodynamiques, sauf dans le terme générateur de la convection naturelle, ou ses variations induisent directement des forces de poussée d'Archimède. Toutes les autres caractéristiques thermo-physiques du fluide (la viscosité dynamique μ, la conductivité thermique k et la chaleur massique à pression constante Cp) sont considérées comme constantes et définies à la température de référence».

Les équations de la continuité de la quantité de mouvement et de l'énergie forment le modèle mathématique de l'écoulement de la convection naturelle laminaire.

Dans le cas de l'écoulement tridimensionnel et stationnaire, le système d'équations, relativement à un système de coordonnées cartésiennes s'exprime comme suit [36] :

II.6.1 Equations dimensionnelles

Une fois les hypothèses mentionnées précédemment prises en compte, il est possible de formuler les équations appropriées pour résoudre le problème étudié dans cette étude de la manière suivante :

a) Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (II.9)$$

b) Equation de quantité de mouvement :

Equation de la conservation de quantité de mouvement suivant x :

$$\rho\left[\frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z}\right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right]\right\} \qquad (II.10)$$

Equation de la conservation de quantité de mouvement suivant y :

$$\rho\left[\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z}\right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial z}\right]\right\} \qquad (II.11)$$

Equation de la conservation de quantité de mouvement suivant z :

$$\rho\left[\frac{\partial(wu)}{\partial x}+\frac{\partial(wv)}{\partial y}+\frac{\partial(ww)}{\partial z}\right] = -\frac{\partial p}{\partial z}+\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial w}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right]\right\}+g\beta(T-T_0) \quad (II.12)$$

c) Equation de l'énergie :

- Pour l'eau :

$$\rho C_p\left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right]=\frac{\partial}{\partial x}\left[K\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K\frac{\partial T}{\partial z}\right] \quad (II.13)$$

-L'équation de l'Isolation thermique :

$$-n.q = 0 \quad (II.14)$$

-Le flux thermique :

$$\Phi = hS(T_P - T_F) \quad (II.15)$$

II.7 Les nombres sans dimensions

Une grandeur sans dimension (ou grandeur adimensionnelle) est une quantité permettant de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicite d'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs à dimensions, de telle façon que le rapport des unités équivaut à un. Ces grandeurs sans dimension interviennent particulièrement en mécanique des fluides et pour la description de phénomène de transfert lorsqu'on utilise la similitude de modèles réduits ou théorie des maquettes et construit l'interprétation des résultats d'essais. Elles portent le nom de nombres sans dimension, nombres adimensionnels, ou encore de nombres caractéristiques [37].

Les nombres adimensionnels les plus utilisé dans le domaine de la convection sont :

a) Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement d'un fluide. Il permet de déterminer si l'écoulement est laminaire (mouvement ordonné des particules de fluide) ou turbulent (mouvement chaotique des particules de fluide). Il peut être exprimé comme :

$$Re = \frac{\rho u_0 Dh}{\mu} \quad (II.16)$$

ρ: la masse volumique du fluide.

u_0: la vitesse de l'écoulement à l'entrée.

Dh: le diamètre hydraulique.

μ : la viscosité dynamique du fluide.

b) Le nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt est utilisé pour décrire les échanges de chaleur par convection naturelle ou forcée. Il permet de calculer le coefficient de film de chaleur (h) qui est une mesure de l'efficacité de l'échange de chaleur entre le fluide et la surface. Il peut être exprimé comme :

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}Dh}{K_f} \qquad (II.17)$$

Où :

K_f: La conductivité thermique de l'air.

$\bar{h}$ **:** Coefficient d'échange convectif moyenne.

II.8 Calcul des grandeurs Hydrodynamique et Thermique

a) Le diamètre hydraulique :

Le diamètre hydraulique est utilisé pour calculer les écoulements dans des conduites non circulaires, comme les écoulements dans des canaux, des conduites annulaires, etc.
Il est défini comme le rapport suivant :

$$D_h = \frac{4.V_f}{A_f} \qquad (II.18)$$

Où :

V_f : est le volume total du fluide à l'intérieur du canal.

A_f : est la surface mouillée, qui est définie comme la surface de transfert de chaleur par convection en contact avec le fluide de refroidissement.

b) Coefficient d'échange convectif h :

Le coefficient d'échange convectif h est un paramètre qui quantifie l'efficacité des échanges de chaleur par convection entre un fluide en mouvement et une surface solide. L'expression du coefficient d'échange moyen est :

$$\bar{h} = \frac{q_c}{A(\overline{T}_w - \overline{T}_m)} \qquad (II.19)$$

q_c: Quantité de chaleur définie par l'expression suivante :

$$q_c = \dot{m}.\ Cp\ .(\overline{T}_{out} - T_0) \quad (II.20)$$

Avec :

$\overline{T}_{out}$: Température moyenne du fluide à la sortie :

$$\overline{T}_{out} = \frac{\iint_A T.u.dA}{\iint_A u.dA} \quad (II.21)$$

T_0: Température d'entrée.

$C\rho$: Capacité (calorifique) massique à pression constante.

$\dot{m}$: Débit massique, en kg/s.

A: surface d'échange thermique.

$\overline{T}_w$: Température moyenne de la surface d'échange :

$$\overline{T}_w = \frac{1}{A}\iint T.dA \quad (II.22)$$

$\overline{T}_m$: Température moyenne de mélange basé sur la masse volumique :

$$\overline{T}_m = \frac{\iiint_V T.u.dV}{\iiint_V u.dV} \quad (II.23)$$

Le coefficient d'échange h est exprimé en W/m^2.K.

c) La Résistance thermique :

La résistance thermique moyenne (R_{th}) du dissipateur thermique est définie comme suit :

$$R_{th} = \frac{\overline{T}_b - T_0}{q_c.A_b} \quad (II.24)$$

Où :

$\overline{T}_b$: Température moyenne de la surface inférieure de le MCHS en (K).

$$\overline{T}_b = \frac{1}{A}\iint T\ .dA \quad (II.25)$$

q_c : Flux de chaleur appliqué à la surface inférieure en (W/m^2).

A_b : Superficie de la base du MCHS (m^2).

d) Coefficient d'uniformité de la température

Le coefficient d'uniformité de la température est défini comme suit :

$$TUC = \frac{T_{max} - T_{min}}{q.A_b} \quad (II.26)$$

Où :

T_{max} : Température maximale du dissipateur thermique surface fond en (K).

T_{min} : Température minimale du dissipateur thermique surface inférieure (K).

Remarque: La valeur la plus basse du coefficient d'uniformité de la température (TUC) représente la plus grande uniformité de température d'une surface [38].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé le modèle physique examiné et les équations qui régissent le phénomène de la convection forcée en régime laminaire.

Dans le prochain chapitre nous allons révéler le logiciel de simulation comsol multiphysics 6.2 et par la suite nous vous illustrerons notre travail de simulation.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1.Introduction

De nombreux défis industriels requièrent des techniques de simulation novatrices. Depuis les années 1970, la simulation numérique est l'un des moteurs principaux de l'innovation scientifique et industrielle. Depuis 1998, COMSOL répond à ces exigences en proposant une solution innovante et multidisciplinaire, alliant puissance et flexibilité pour simuler des applications impliquant un ou plusieurs phénomènes physiques.

Nous commencerons par valider nos résultats en les comparants aux données expérimentales disponibles dans la littérature, ainsi qu'aux simulations effectuées avec le code Fluent [38]. Ensuite, nous aborderons divers cas possibles en fournissant des interprétations détaillées.

III.2.Géométrie de notre étude

III.2.1. Description du problème

Le code Comsol-Multiphysics a été utilisé pour simuler le transport de l'écoulement et l'évolution de la température. La configuration géométrique considérée dans le présent travail est illustrée sur la figure (III1).

Nous allons nous intéresser à l'étude numérique du comportement thermique de l'écoulement d'eau en convection forcée laminaire stationnaire dans la configuration de dissipateur thermique à micro-canaux MCHS fabrique en cuivre. Les données de dimensionnement de dissipateur de chaleur sont tirées de la référence [38].

- La longueur : L=10mm
- Le largueur : W=5mm
- La hauteur : H=1mm
- Largueur et longueur des canaux : Hc=Wc=0.3mm
- Espace entre les canaux : Wt= 0.2mm
- Espace entre les canaux et le haut de MCHS : t_1=0.1mm

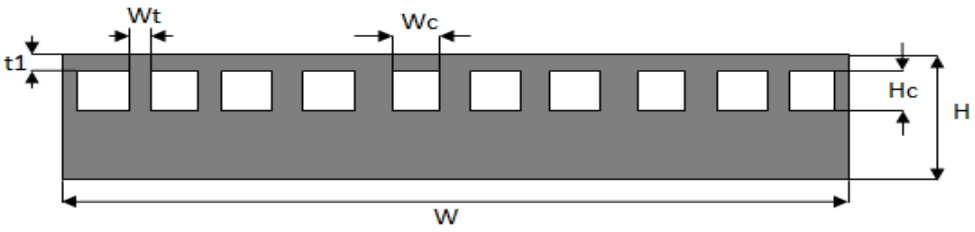

Figure -III1- Geométrie étudie

III.2.2. Les conditions aux limites

Pour les conditions aux limite dans le logiciel en trouve les paramètres en entré tous les conditions aux limite, les dimensions et les équations selon les cordonner.

Dans nos dissipateurs en a :

- Dans l'entrer de micro-canaux :

  - Une température initial Tin=300k

  -Une vitesse $U_{in} = R_e * Muf/(Rof * Dh)$ (III3)

- Dans le bas ;

  -Un flux thermique Q= (0.1-1.6)*10^7 W/ m^2

Pour le nombre de Reynolds Re= 200

Les équations :

$Dh = 2 * H_c * W_c/(H_c + W_c)$ (III2)

$P_0 = Q * L$ (III3)

Muf=0.8509[s*m.pa]

Rof=0.997[g /m^3]

Après cette opération d'entrer les conditions aux limites en passe à les autres étapes de simulation.

III.3.Maillage

La génération du maillage, qu'il soit en 2D ou en 3D, est une étape cruciale dans une analyse, car les paramètres du maillage influencent significativement la solution calculée. Ce menu permet de mailler spécifiquement une ligne de la géométrie, en disposant les nœuds selon des conditions particulières, telles que l'utilisation d'un ratio pour ajuster la pondération du maillage ou l'application de différentes formes de maillage.

III.3.1. Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats Numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer:

- Le nombre de mailles,
- La distance entre les mailles (concentration des mailles),
- La forme de la maille,
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable,

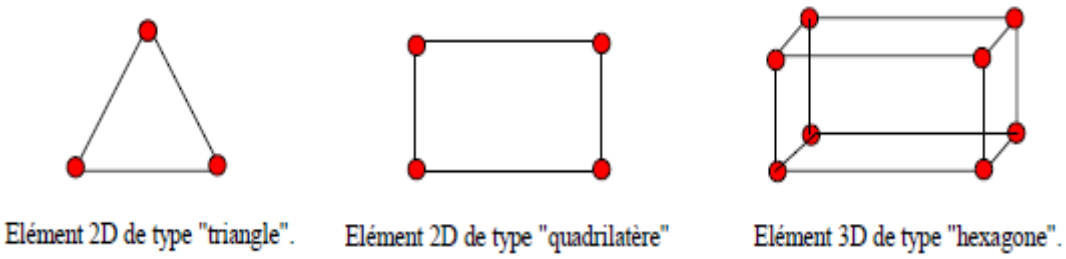

Figure III.2 : Les différentes formes de maillage des éléments

III.3.2. Test de convergence

Des simulations numériques ont été testées en variant le nombre d'éléments de calcul, Une stabilité et une convergence du modèle été atteinte pour différents maillages.

Le type de maillage choisit pour la géométrie étudiée est « user-controlled mesh », avec des éléments de type « triangulaire libre » prédéfini par « Grossier » et un raffinage dans la paroi.

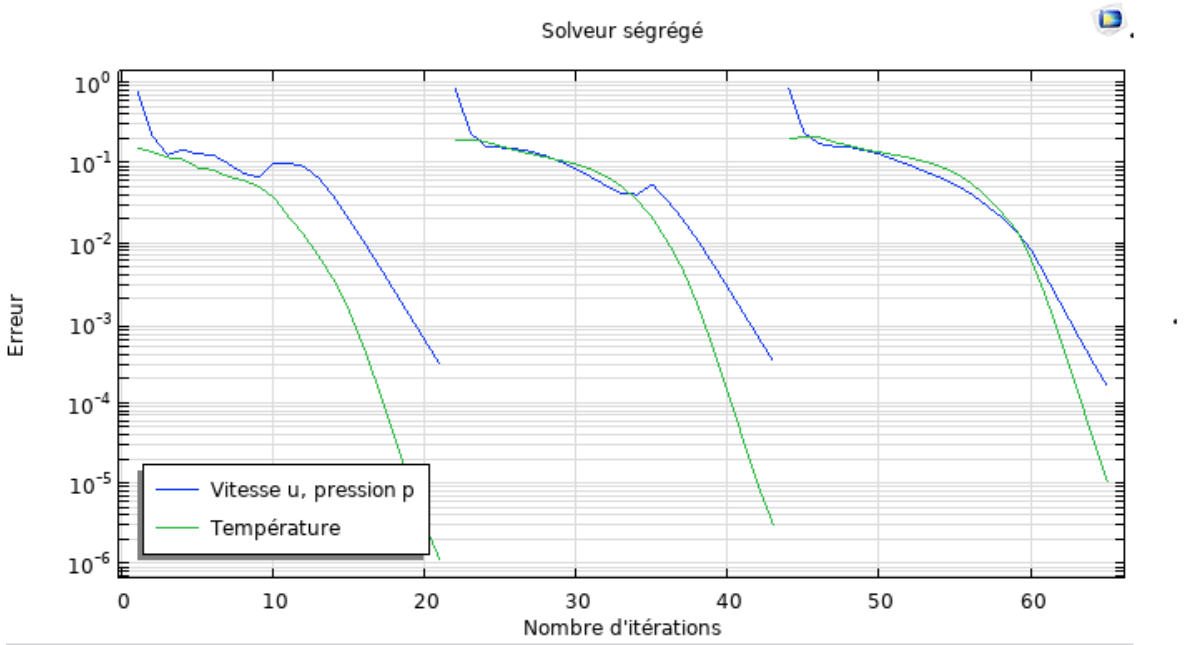

Figure -III.3- Test de convergence

III.4. Sensibilité du maillage

L'influence de la taille et du nombre des nœuds sur la solution exprimée par le transfert thermique est très important, le profil de la température doit être sensible.

Pour voir l'influence du choix de maillage, nous proposons quelque configuration des différents maillages.

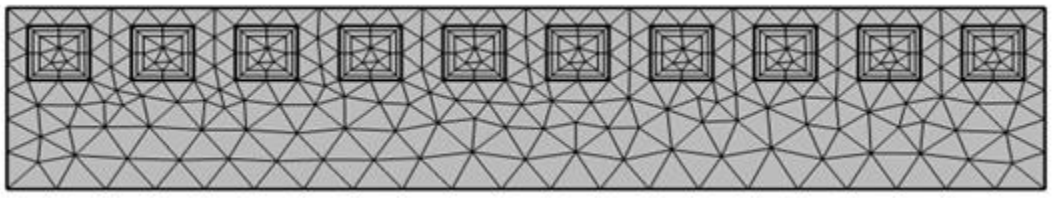

Figure-III4- Maillage grossier

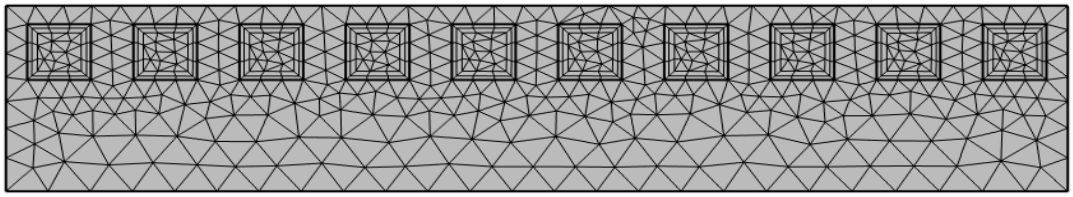

Figure-III5-Maillage normale

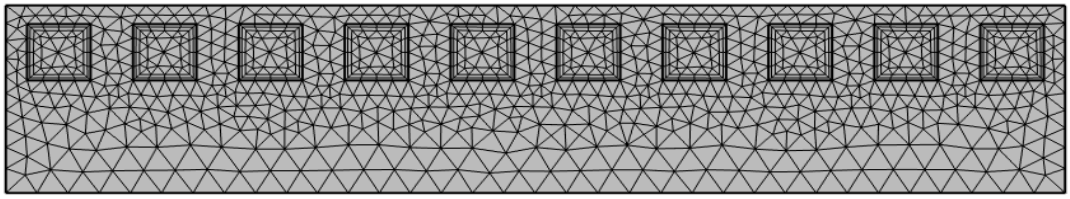

Figure-III6-Maillage fine

III.4.1.Résultats de maillage

Le tableau -III1- suivant représente quelques détails sur les résultats de maillage :

Type de maillage	Grossier	Normal	Fine
Point du maillage	33958	46940	106527
Nombre d'élément	129934	186201	459519
Qualité minimal des éléments	0.1003	0.1712	0.1472
Qualité moyenne des éléments	0.5991	0.6377	0.6604
Rapport de volume des éléments	0.002536	0.001656	0.0008768
Volume du maillage	50 mm^3	50 mm^3	50 mm^3

Tableau-III1- Les résultats de maillage

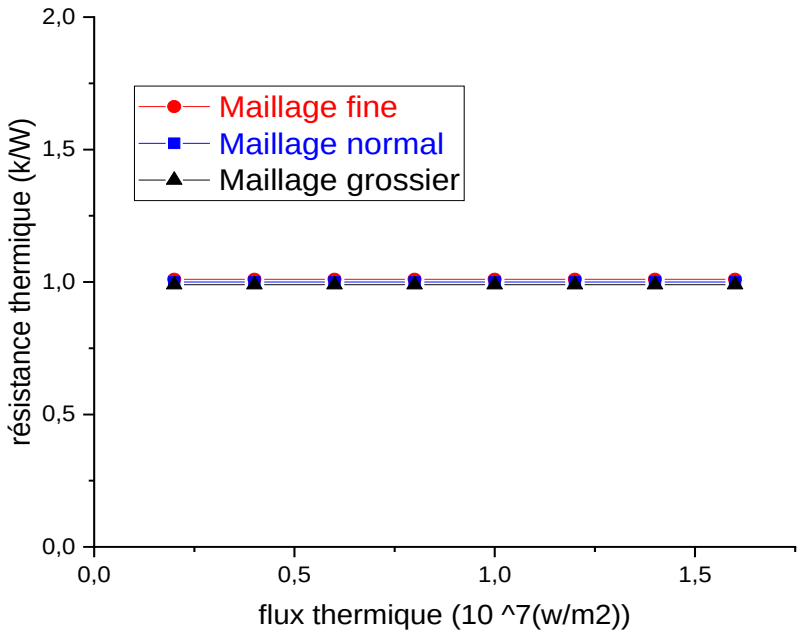

Figure-III7- Optimisation du maillage.

Représentation de la Résistance thermique par rapport le flux dans les trois type de maillage

Remarque : suivant la figure-III7- et le tableau-III1-les résultats prouvent que la résistance thermique dans les trois types de maillage (grossier-normal-fine) respectivement présente une valeur égale (0.99-1-1.1)K /W qui es presque les même valeur, donc, c'est pour cela nous avons choisi le maillage **Grossier** pour la suite de notre travail de simulation.

III.5. Validation Des résultats

Les résultats de la simulation numérique ont été validé avec la simulation de l'article [39] pour les trois paramètres (Température moyenne en bas de MCHS – de MCHS complet par rapport sa longueur et la résistance thermique par rapport le flux thermique).

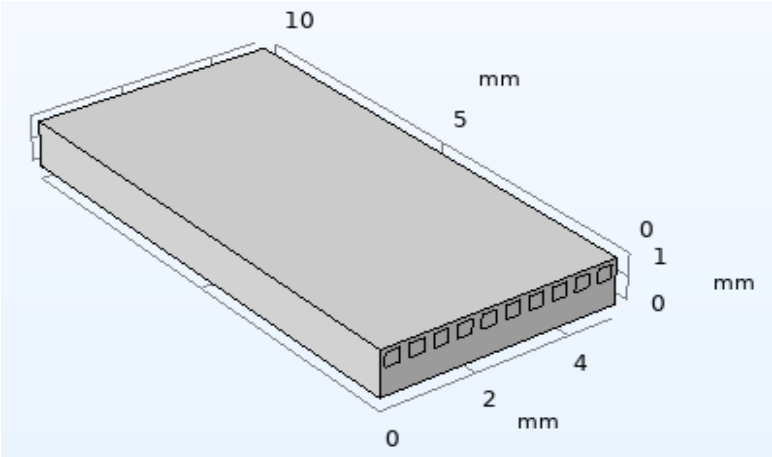

Figure-III8-Géométrie étudié

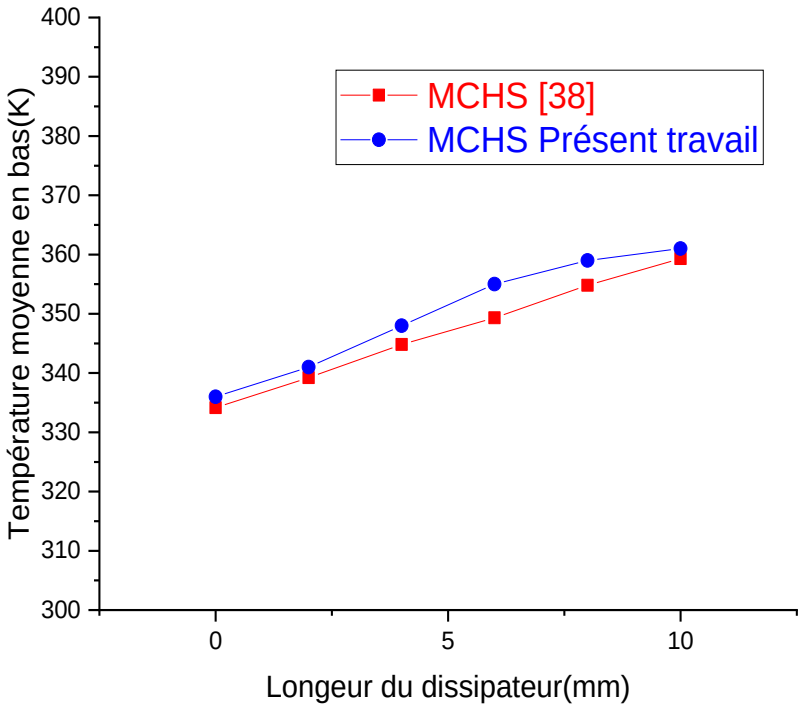

Figure-III9-Validation de résultats de température moyenne en bas de MCHS

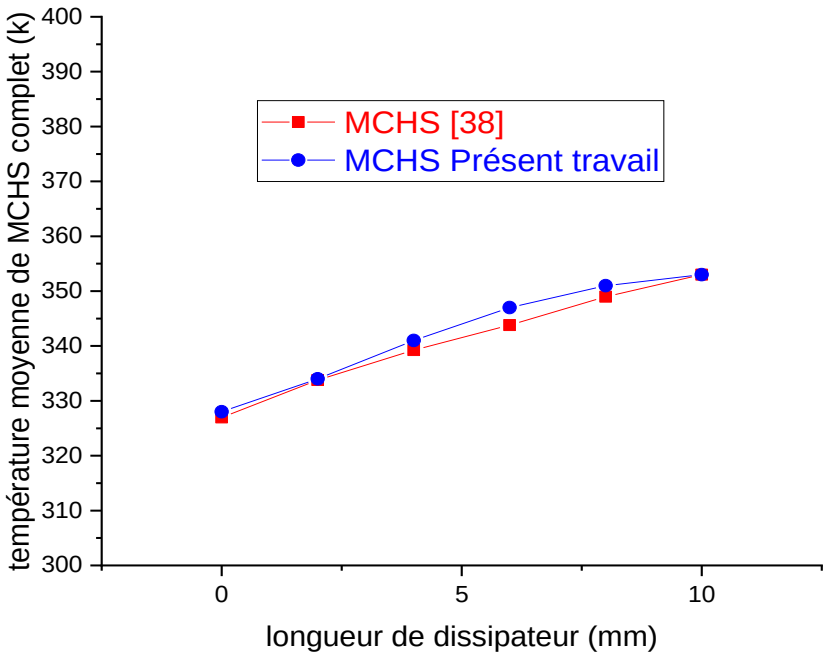

Figure-III10-Validation de résultats de température moyenne de MCHS complet

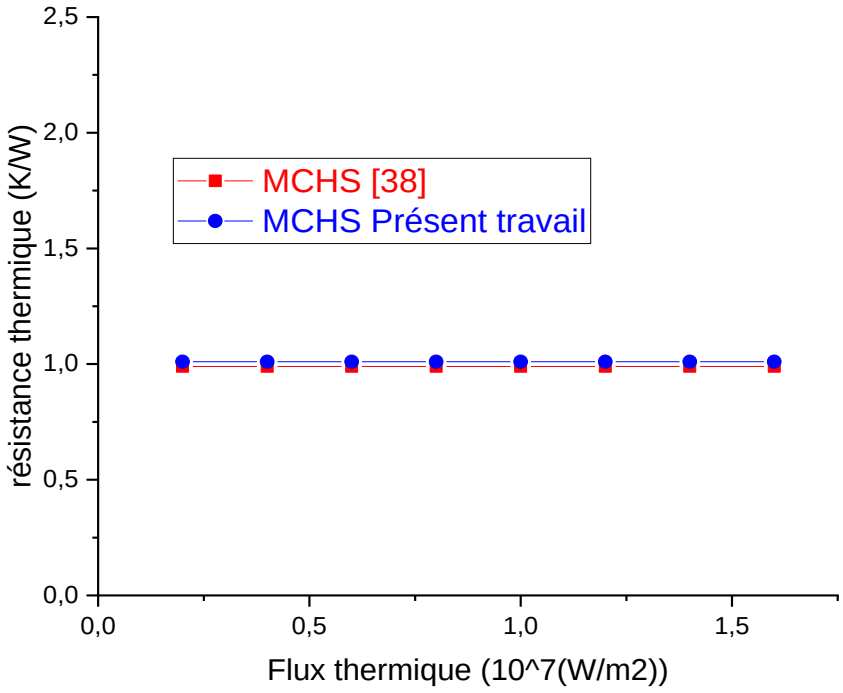

Figure-III11-Validation des résultats de résistance thermique par rapport au flux

Après un traitement numérique effectué par le logiciel Comsol multiphysics, nous pouvons prononcer que nos résultats sont en bonne concordance avec les résultats trouvés dans [39]. Cependant, nous allons présenter d'autres résultats trouvés en étudiant des cas suggérés, afin de voir les performances du dissipateur à micro-canaux.

III.6. Résultats et discussion

III.6.1Etude du profil de température

La figure-III12- présente le comportement de température le long de dissipateur MCHS. Elle atteint au long de dissipateur MCHS, la valeur 354 k. A l'entré de micro-canaux, quand à voire une température petite qui augmente progréssivement le long du MCHS.

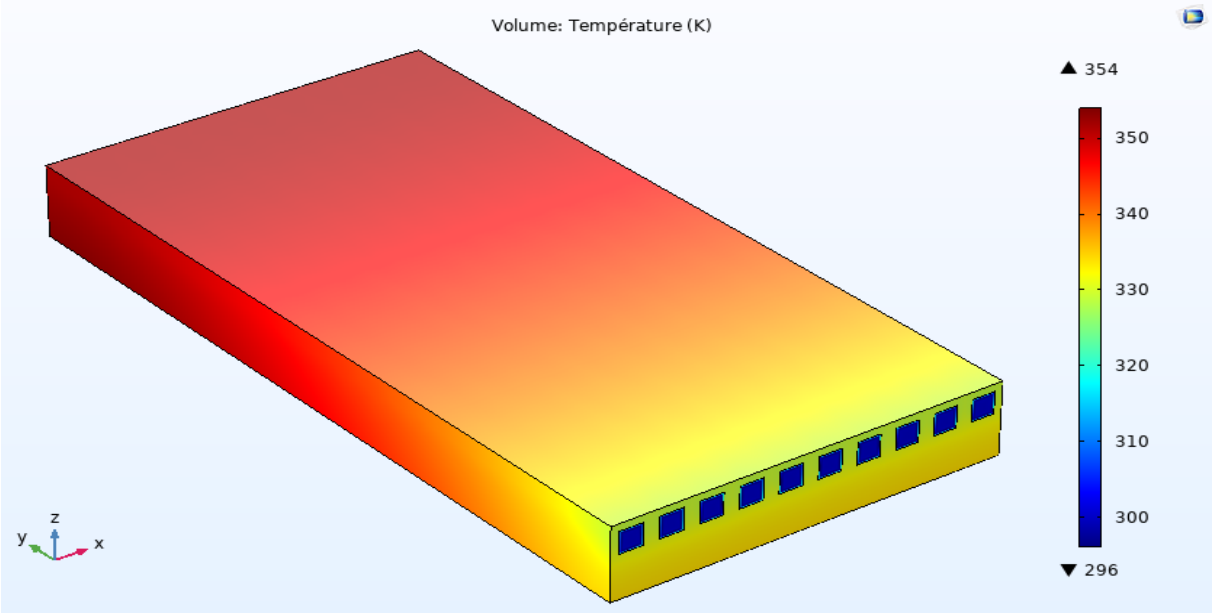

***Figure** –III12-Distribution de température le long de dissipateur MCHS*

La variation de la température moyenne et la résistance thermique pour le MCHS et pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température en fonction de longueur de MCHS, ainsi que sa résistance thermique en fonction de flux.

Les figures représentent la variation de la température moyenne du dissipateur thermique et de la surface inférieure (base) du dissipateur thermique sur la longueur, respectivement.

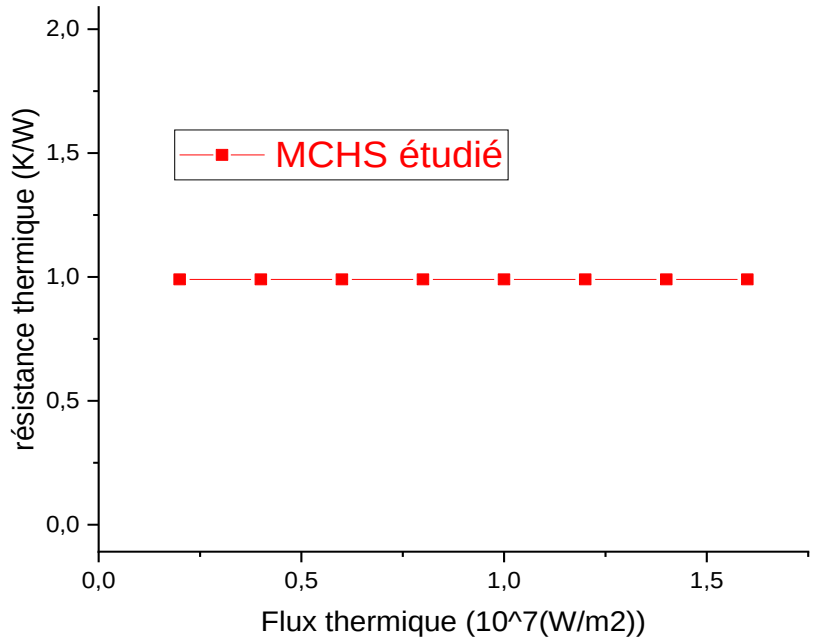

Figure-III13-Résistance thermique en fonction de flux de MCHS

La figure-III13- montre l'évolution de la résistance thermique de MCHS en fonction le flux qui atteint Rt=0.99 k/W.

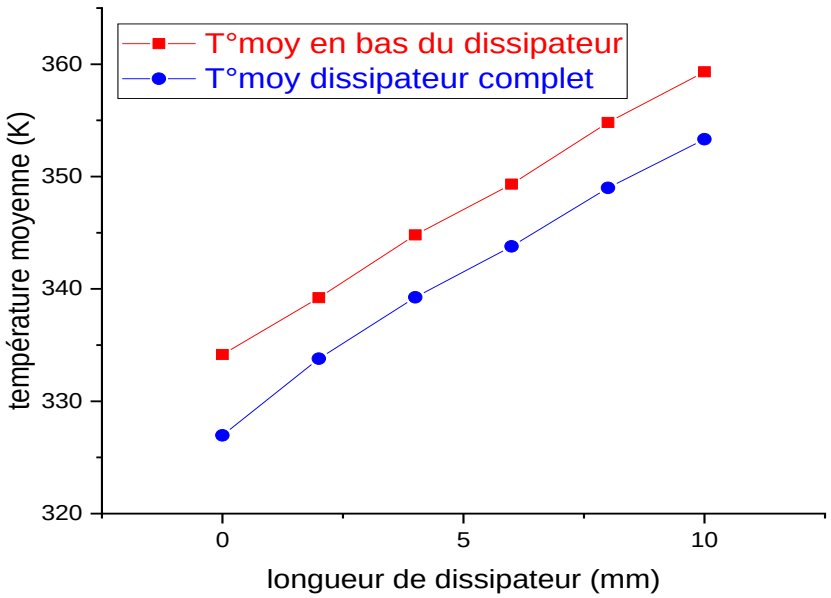

Figure-III14-Courbe de température moyenne en bas et complet de MCHS en fonction de sa longueur

La figure (III.14) représente les profils de la température moyenne de long de MCHS, en bas et pour le dissipateur complet d'après ces configurations, on constate que la température moyenne diminue de 359K à 328K au long de dissipateur, ce qui est un avantage et un gain considérable.

III.7.Cas étudié

III.7.1.Dissipateur a micro-canaux forme rectangulaire

Dans ce cas on a gardé les mêmes dimensions et les mêmes conditions aux limite du dissipateur à par les dimensions des micro-canaux présenté sur la figure–III9-. La largueur de canaux Wc=0.3 mm et une hauteur de Hc=0.8mm fabriqué en cuivre avec de l'eau circulant dedans. Cependant, une simulation a été entamée.

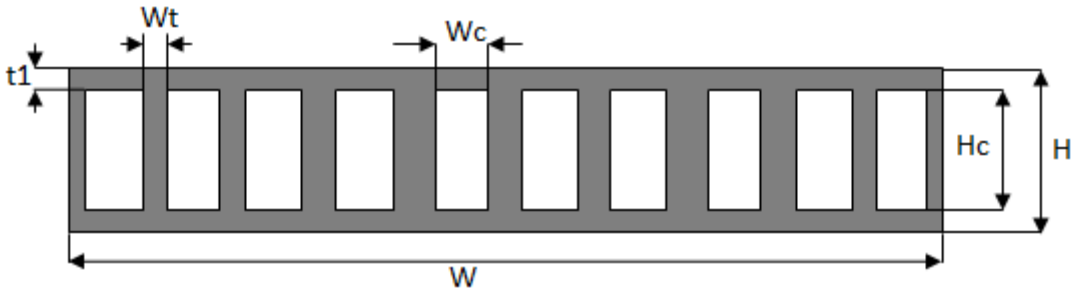

Figure-III15-Géométrie MCHS à micro-canaux rectangulaires

III.7.1.1 Résultats

III.7.1.1 Etude du profil de température

Dans la figure-III16- on observe le comportement de température le long de dissipateur MCHS.

La température augmente le long de dissipateur MCHS à micro-canaux rectangulaire, au contraire de l'entré de micro-canaux quand à voire une température petite qui vas augmenter le long de MCHS.

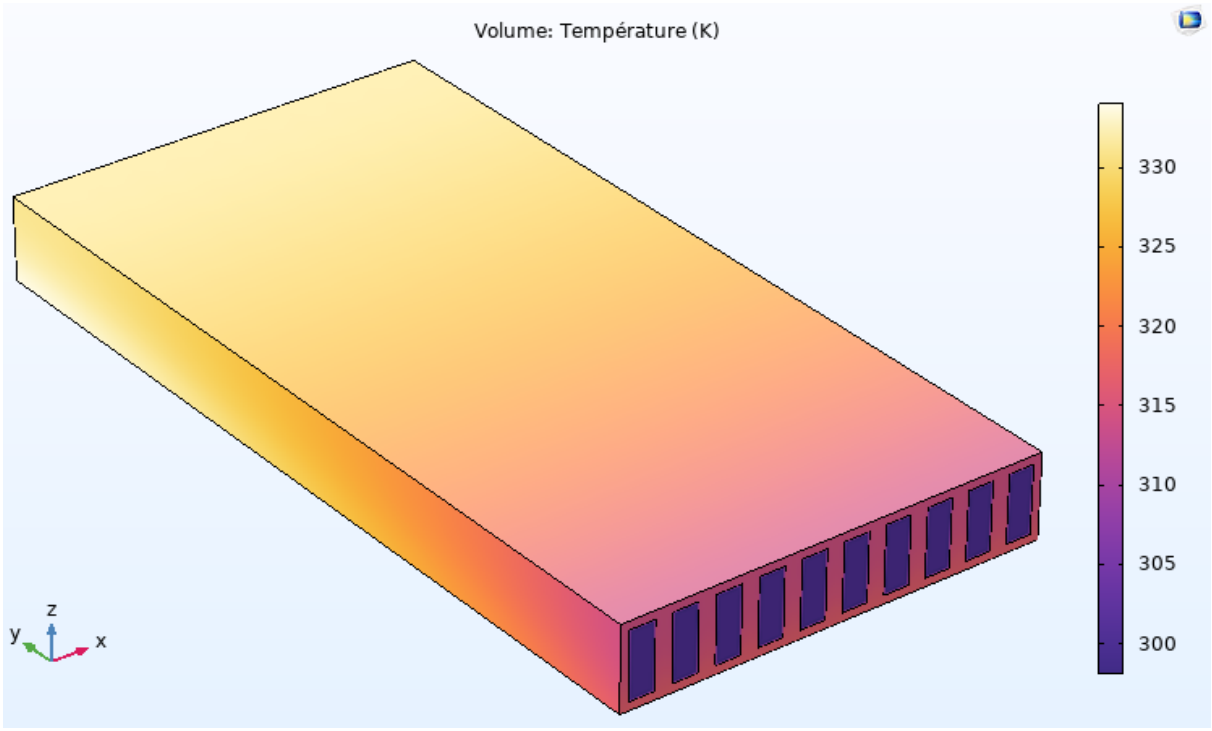

Figure-III16-Distribution de température au long de MCHS rectangulaires

La variation de la température moyenne et la résistance pour le MCHS à micro-canaux rectangulaire pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température en fonction de longueur de ce cas et sa résistance thermique en fonction de flux thermique.

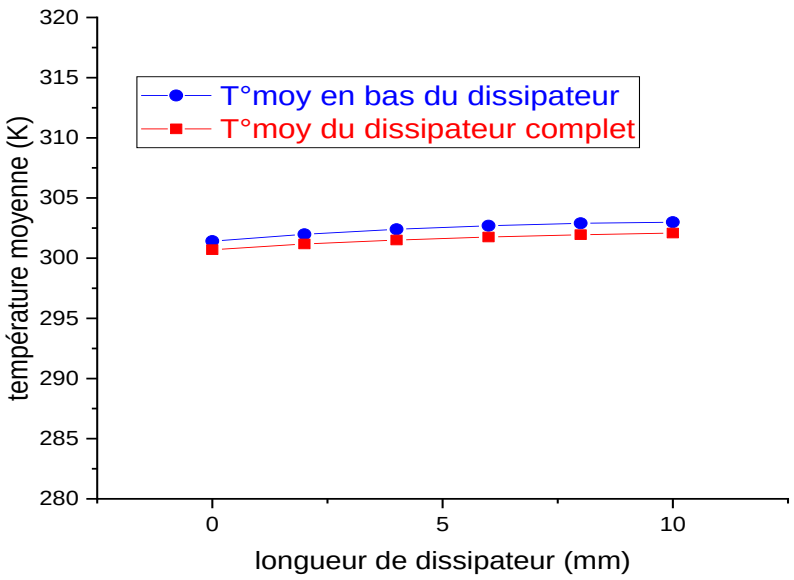

Figure-III.17- Température moyenne en bas et en complet de MCHS rectangulaires en fonction sa longueur

La figure (III.17) présente les profils de la température moyenne de long de MCHS rectangulaires, en bas et complet d'après les configurations suivantes on constate que :

Il y a une baisse de la température moyenne le long du dissipateur complet nettement observée.

Pour la résistance thermique, on a tracé une courbe de Rt en fonction de flux Q. La figure-III18- montre la résistance thermique de MCHS en fonction le flux qui atteint une valeur proche de Rt=0.50 k/W.

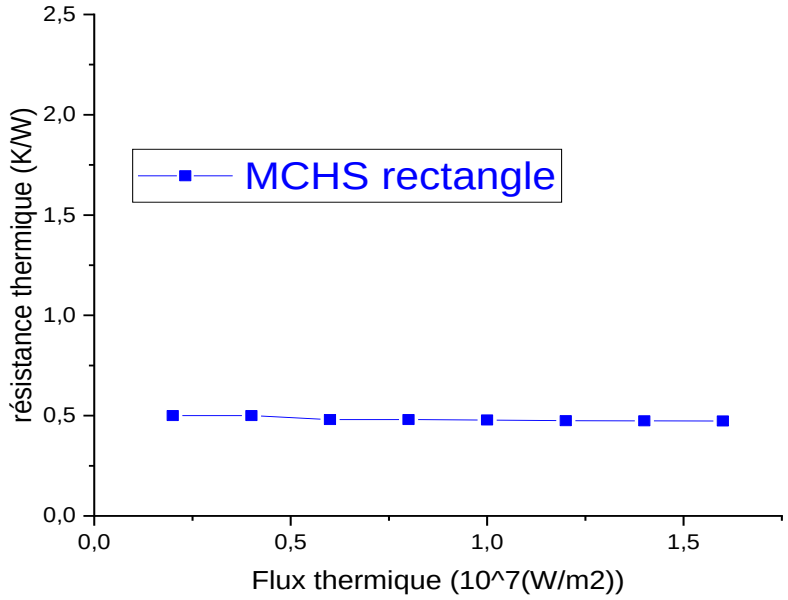

Figure-III18-Courbe de résistance thermique en fonction de flux de MCHS rectangulaires

III.8.Dissipateur thermique MCHS avec ailettes

Comme précédemment, les dimensions et les conditions aux limite de dissipateur sont les mêmes, à par les micro-canaux, on a introduit des ailettes dans les canaux en deux rangées. Chaque canal possède un nombre d'ailettes égale à n=10, et un diamètre d=0.05mm fabriqué en cuivre, avec de l'eau circulant dans les canaux, voir la figure –III19-

Ensuite une simulation a été entamée.

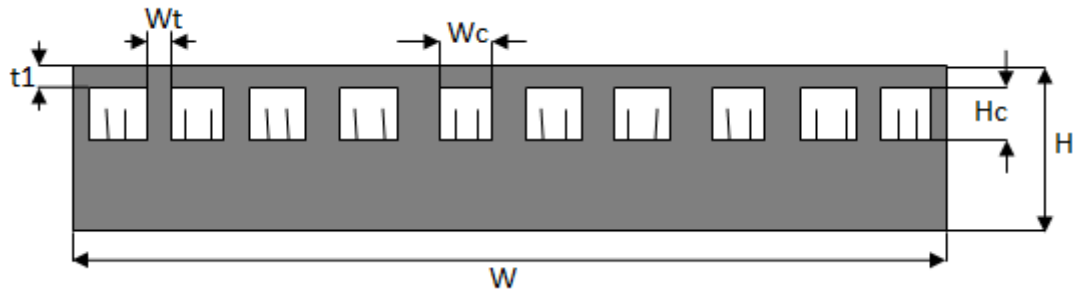

Figure-III19-Géométrie de MCHS à ailette

III.8.1. Résultats

III.8.1.Etude du profil de température

Sur la figure-III20- le comportement de température au long de dissipateur MCHS à ailette est enregistré. La température augmente au long de dissipateur MCHS à ailettes, au contraire de l'entré des micro-canaux quand a voire une température petite qui vas augmenter au long de MCHS.

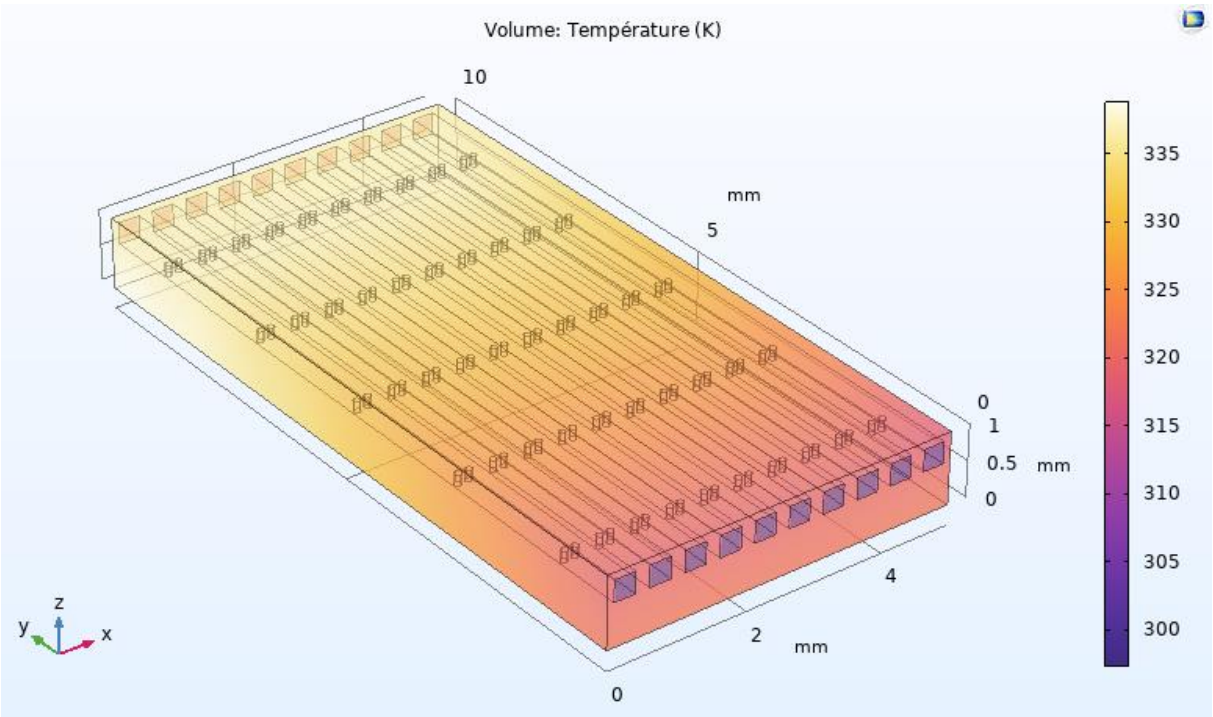

Figure-III20-Distribution de température aux longs de MCHS à ailette

La variation de la température moyenne et la résistance pour le MCHS à ailettes et pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température en fonction de longueur de ce cas et sa résistance thermique en fonction de flux thermique.

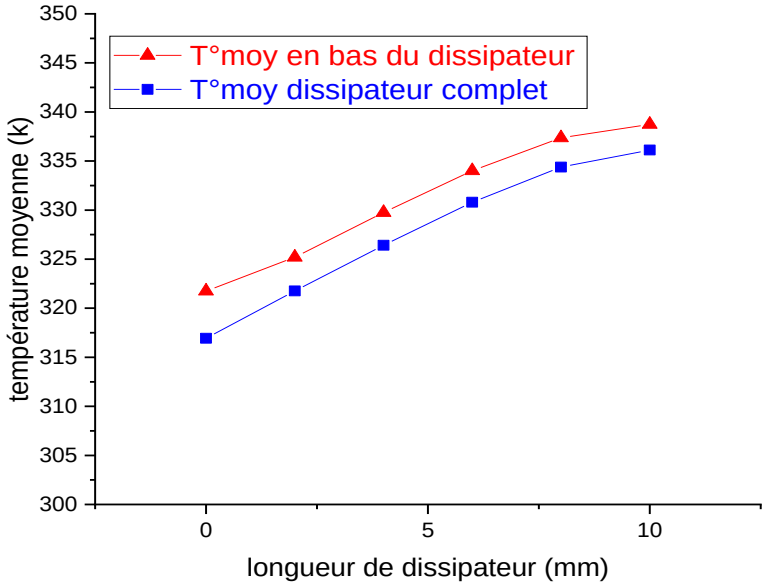

Figure-III21- Température moyenne en bas et complet d'un dissipateur à ailettes.

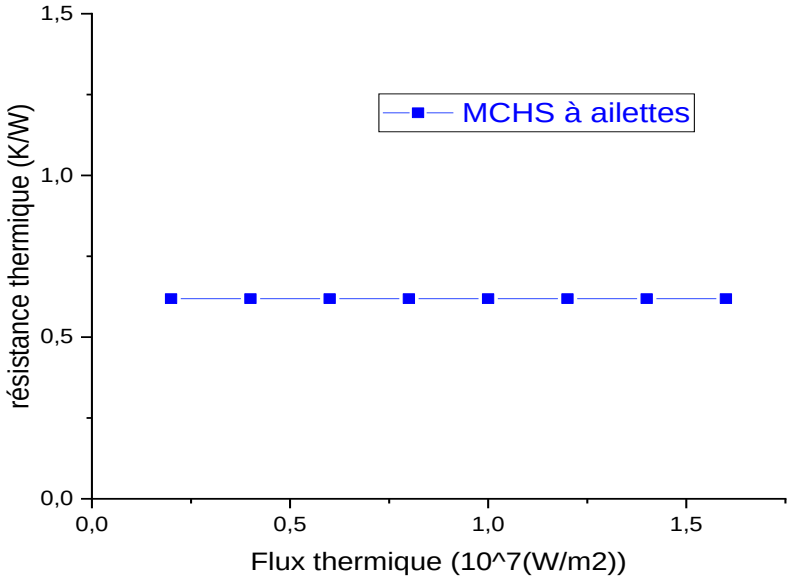

Figure-III22-Courbe de résistance thermique en fonction le flux de MCHS à ailette

La figure (III.21) présente les profils de la température moyenne de long de MCHS à ailettes, en bas du dissipateur complet, on constate que la température moyenne aperçue le long du dissipateur complet a nettement diminuée.

Pour la résistance thermique en a tracé une courbe de Rt en fonction de flux Q. La figure-III22- montre le comportement de la résistance thermique de MCHS en fonction le flux qui atteint Rt=0.619 k/W.

III.9.Dissipateur thermique avec PCM paraffine

Toujours dans les même conditions de dissipateur à par dans les micro-canaux on a ajouté un PCM (matériaux à changement de phase) qui est le paraffine, dans le nouveau canal (rectangle en bas) de dimension hauteur 0.2mm et largeur Wp=4.5mm avec des nouvelles conditions, il s'agit de :

- Densité : T=300K -------- = 870(Kg/m3)

  T=340K --------= 780(Kg/m3)

- Capacité thermique : Cp=2900 (J/kg.k)

- Conductivité thermique: T=300K --------0.24 (W/mk)

  T=340K --------0.22 (W/mk)

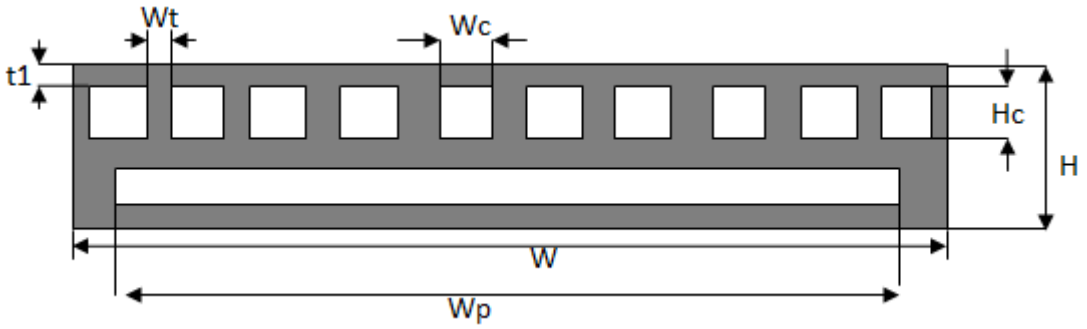

Figure-III23-Géométrie de MCHS avec PCM paraffine

III.9.1. Résultats

III.9.1.1. Etude du profil de température

La figure-III24- présente le comportement de température au long de dissipateur MCHS avec le PCM paraffine.

La température augmente au long de dissipateur MCHS à paraffine en contraire de l'entré de micro-canaux quand a voire une température petite qui vas augmenter au long de MCHS.

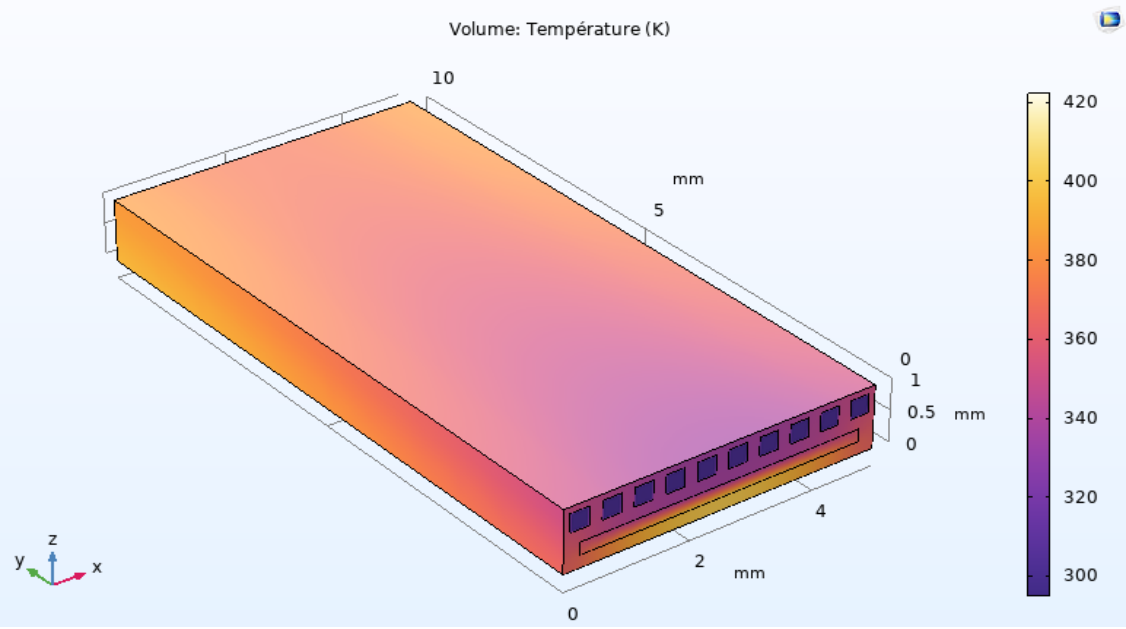

Figure-III24-Distribution de température aux longs de dissipateur avec PCM paraffine

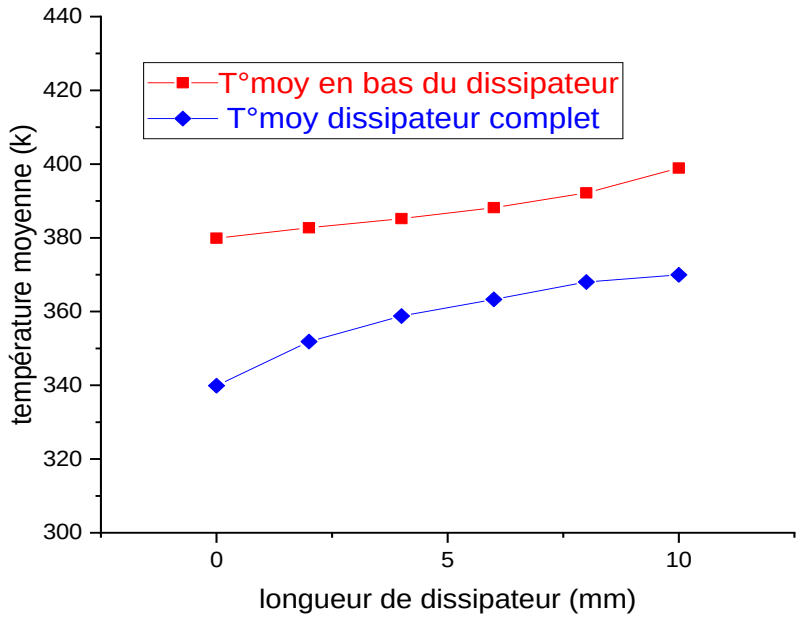

Figure-III25- Courbe de température moyenne en bas et complet de MCHS à PCM paraffine

Les profils de la température moyenne de long de MCHS à PCM paraffine, en bas et du dissipateur complet sont présentés sur la figure (III.25).

Le long du dissipateur (complet), la température a clairement diminuée de 398,92K à 369,98K.

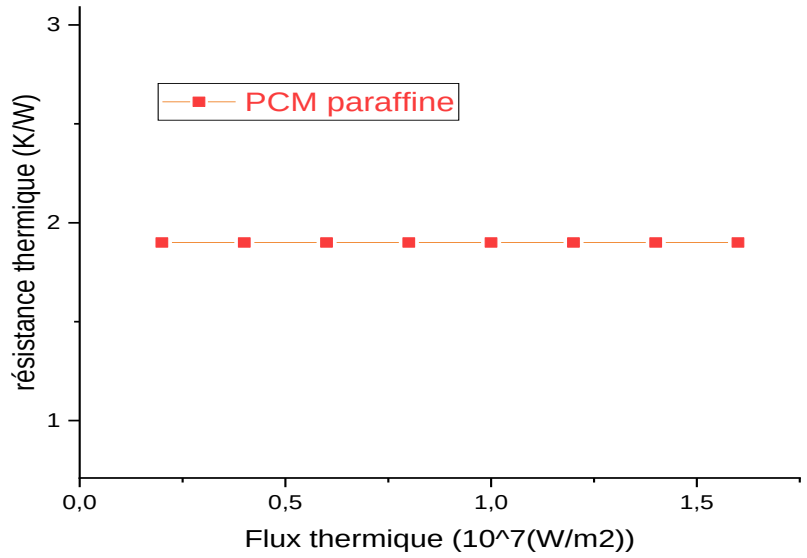

Figure-III26-Résistance thermique de PCM paraffine

La figure-III26- considère la résistance thermique de MCHS avec PCM en fonction le flux qui atteint une Rt=1,9 k/W.

III.10.Dissipateur thermique à PCM n-eicosane

Dans cette partie, et avec les mémés conditions, on a ajouté un autre PCM (matière changement de phase) qui est le n-eicosane dans le nouveau canal avec les caractéristiques suivantes :

- Densité : T=300K -------- = 770 (Kg/m3)

  T=340K --------= 780(Kg/m3)

- Capacité thermique : Cp=2460 (J/kg.k)
- Conductivité thermique: T=300K --------0.35 (W/mk)

  T=340K --------0.15 (W/mk)

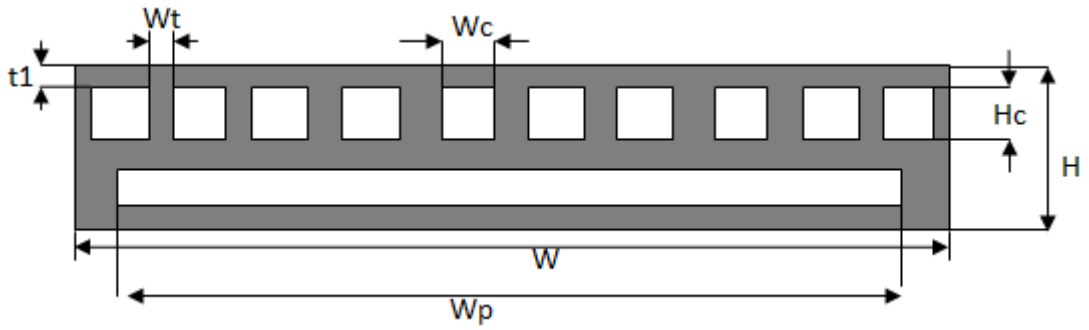

Figure-III27-Géométrie n-eicosane

III.10.1.Résultats

III.10.1.1. Etude du profil de température

La figure-III28- présente le comportement de température au long de dissipateur MCHS à PCM n-aicosane.

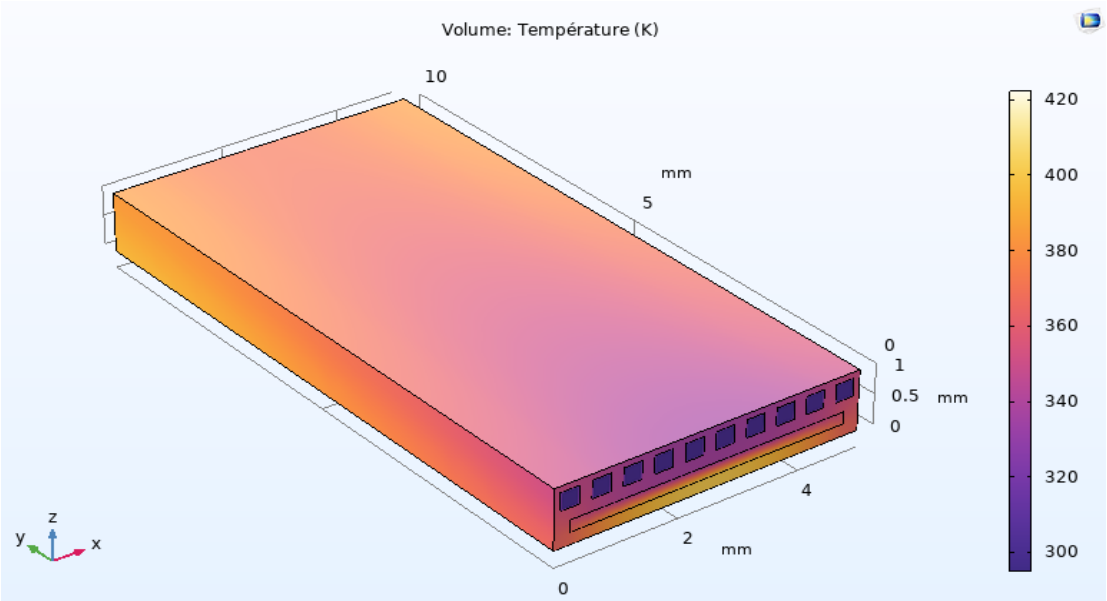

Figure-III-28-Distribution de température aux longs de MCHS avec PCM

La variation de la température moyenne et la résistance pour le MCHS à PCM n_eicosane pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température en fonction de longueur de ce cas et sa résistance thermique en fonction de flux thermique.

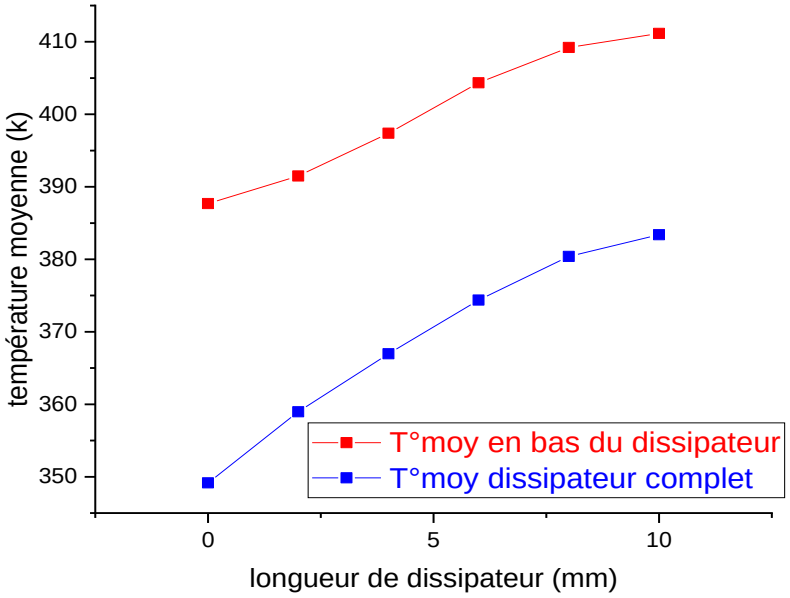

Figure-III29-Courbe de température en bas complet de PCM n-eicosane

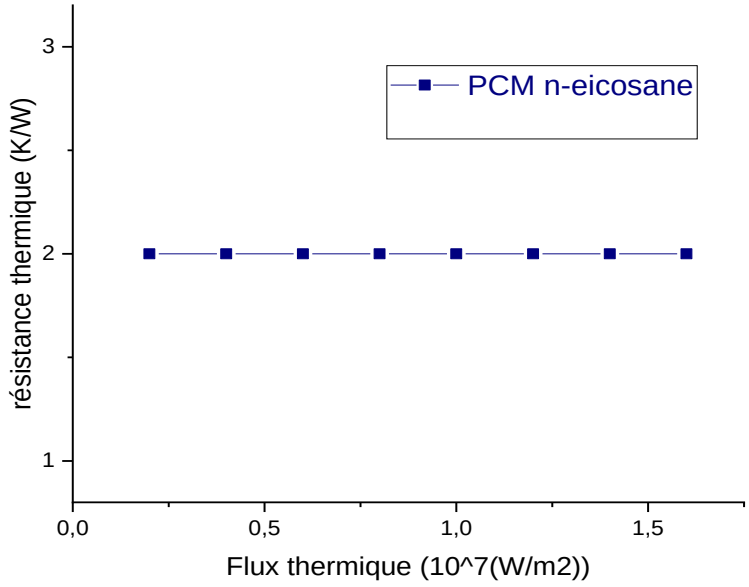

Figure-III30-Résistance thermique de PCM n-eicosane

La figure (III.29) concerne les profils de la température moyenne de long de MCHS à PCM n-eicosane, en bas et complet d'après les configurations suivantes on constate que :
Il y a une augmentation considérable de la température de moyenne en bas et complet qui atteint 411K en bas et à 398K au long de dissipateur.

Pour la résistance thermique on a tracé une courbe de Rt en fonction de flux Q présentée par la figure-III30- , observe la résistance thermique de MCHS avec PCM en fonction du flux qui atteint Rt=2 k/W *de PCM n-eicosane.*

III.11. Comparaison entre les deux PCM

Dans les deux derniers cas quand à étudier les dissipateurs thermiques à micro-canaux avec un matériau à changement de phase PCM, il s'agit de la paraffine et du n-eicosane pour distinguer le meilleur entre les deux. Cependant nous avons comparé les résultats de résistance thermique et de la température moyenne en bas du dissipateur et du dissipateur complet.

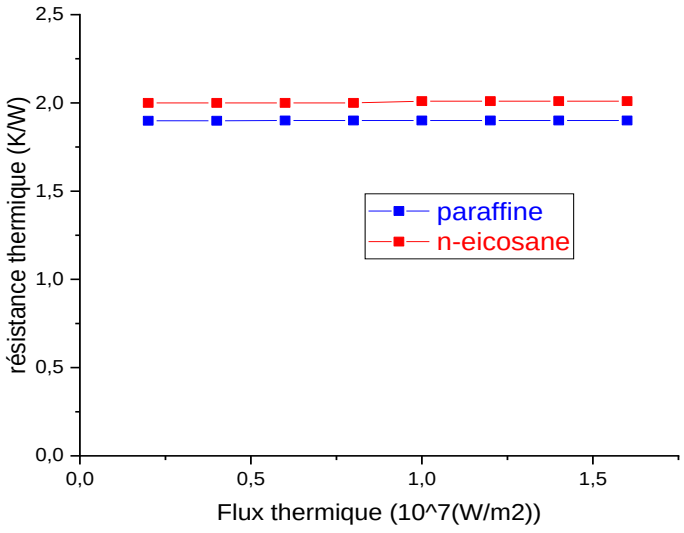

Figure-III31-Comparaissent de résistance thermique en fonction de flux entre paraffine et n-eicosane

Les résultats de Figure-III31- montre que la résistance thermique de PCM paraffine a une Rt=1.9 K/W en contraire de PCM n-eicosane qui a une Rt=2K/W. Alors, la résistance de paraffine est très fiable par rapport au n-eicosane.

Dans la Figure-III32- on remarque que la température moyenne en bas de dissipateur à PCM n-eicosane : Tmoy =411K, elle est supérieur par rapport au paraffine qui a une valeur de Tmoy=398.92K.

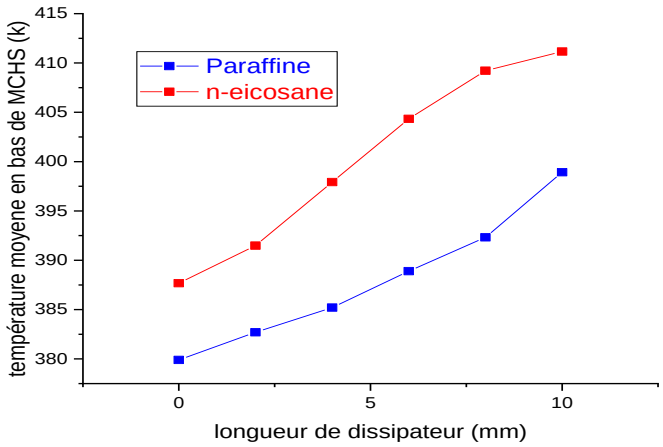

Figure-III32-Comparaisson de température moyenne en bas de paraffine et n-eicosan en fonction de ces longueurs

Sur la Figure-III33- on a comparé les températures moyennes du dissipateur complet de paraffine et n-eicosane en fonction de la longueur. Le n-eicosane a une température moyenne du dissipateur complet supérieure par rapport le paraffine de Tmoy= 369.98k.

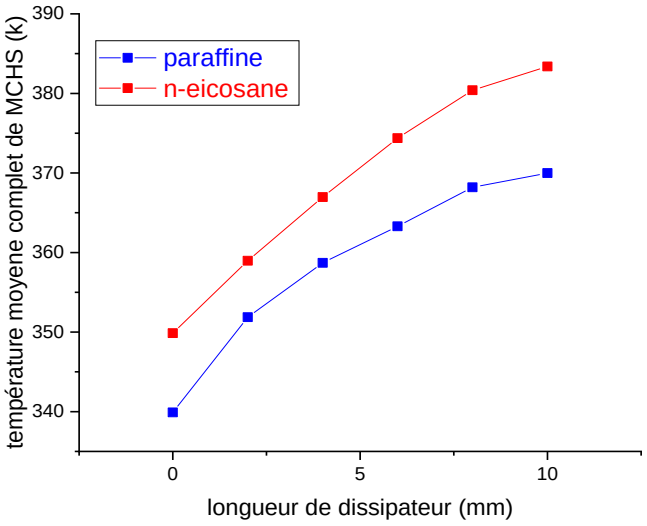

Figure-III33-Comparaissent de température moyenne complète de paraffine et n-eicosan en fonction de toute longueur

Le matériau à changement de phase paraffine est nettement efficace que le n-eicosane pour une dissipation idéale.

III.12.Conclusion

A travers ce chapitre, nous pouvons dire que le logiciel Comsol-Multiphysics 6.2, nous a permis un traitement numérique assez bénéfique au point de vue des résultats obtenus des différents paramètres vis-à-vis de ceux trouvés expérimentalement et par le logiciel Fluent.

Le logiciel Comsol-Multiphysics 6.2 a montré à plusieurs reprises ses qualités numériques, qu'on souhaite l'exploiter au maximum pour développer encore plus ce travail, aussi même l'appliquer à d'autres travaux numériques.

Cette étape nous a permis de voir le comportement de fluide et par la même occasion d'étudier la température moyenne en bas et tout le dissipateur thermique.

La géométrie du dissipateur thermique et la forme du canal ont une influence notable sur les caractéristiques de transfert de chaleur de dissipateur thermique

Les matériaux à changement de phase (PCM) comme le paraffine sont populaires dans les applications de gestion thermique. Il a la capacité d'augmenter les performances du MCHS.

Nous espérons que cette étude serait bénéfique à faire avancer le domaine de la recherche scientifique.

Conclusion générale

L'utilisation de COMSOL présente de nombreux avantages dans la conception et l'analyse des dissipateurs de chaleur. COMSOL est un logiciel de simulation multi-physique puissant utilisé pour modéliser et résoudre des problèmes complexes liés au transfert de chaleur. Il offre une gamme d'outils et de fonctionnalités avancés qui permettent d'étudier et d'optimiser les performances des dissipateurs de chaleur

En intégrant les micros canaux dans la conception des dissipateurs de chaleur et en utilisant COMSOL conjointement, il devient possible d'obtenir des résultats plus précis et plus efficaces. Les simulations réalisées avec COMSOL permettent d'évaluer et de comparer diverses configurations de dissipateurs de chaleur, d'optimiser les paramètres de conception et de repérer les zones critiques nécessitant des améliorations.

Les micros canaux offrent une opportunité intéressante d'améliorer les performances des dissipateurs de chaleur. Ils peuvent contribuer à une meilleure dissipation de la chaleur, réduire les gradients de température et permettre une meilleure gestion thermique dans diverses applications.

COMSOL Multiphysics représente un outil précieux pour l'analyse et l'optimisation des dissipateurs de chaleur, tandis que l'intégration des micros canaux offre une approche prometteuse pour améliorer les performances de dissipation thermique. La combinaison de ces deux éléments peut conduire à des dissipateurs de chaleur plus efficaces et à une gestion thermique améliorée dans divers domaines d'application.

Pour résumer, cette étude de recherche permettra d'établir une fondation solide pour appréhender les dissipateurs de chaleur, en englobant les aspects théoriques, mathématiques et pratiques. Les connaissances et les résultats acquis grâce à cette étude offriront des opportunités pour la conception et l'amélioration des dissipateurs de chaleur dans diverses applications industrielles et électroniques.

Références Bibliographique

[1] B-Maria sara, B-Farhouh «l'analyse numérique du refroidissement à air des convertisseurs électronique par convection naturelle et forcé »2015

[2] K- Nuga ramesh, T-Karthkkeya sharma, G-Amba prasad rao, K-Madhu « Numerical investigation on thermal performance of PCM based hybrid microchanel heat sinks for électronic cooling application »2022. https://dol.org/10.1007/s133369-022-07007-w

[3] M-Bermard « les dissipateur thermique –lycée la chanel le 12-03-2009.

[4] Canada.lenovo.com/Fr/car/en/geossary/what.

[5] J-battaglia, A-Kusiak, J-rpuiggact « introduction au transfert thermique : cour et exercice corrigé 2c.éd. Paris dound 2014.

[6] B-Debich « modélisation simulation et fiabilité des matériau à changement de phase pour l'automobile et l'aéromatique »Doctorat nomadie université 2021.

[7] « Internl conbution enging heat transfert outline » eng.colstate.edu.

[8] M-lotfi « modélisation et optimisation de l'effet de l'auto échauffement des composants électronique de puissance –univ.batna2-2017.

[9] « électronique équipement friture : cause effet and résolution » inovative compressed air technologie.

[10] Z-Zhang « gestion thermique des composants électronique de puissance utilisation du diamant CVD »Doctorat –université de Toulouse 2012.

[11] T-I-N-Rasolofomanana « refroidissement d'un dispositif électronique par ailette thermique » master-univ-d'antananairo 2012.

[12] A-A-Almubrak « the effect of heat on électronic composent » int-journal of engineering résearch and application p52-57 mai 2017.

[13] https://eshop.wuerth.at./product catégories/heating.-pad-coil-F-induction-heat-ieg-power 31235004151211.

[14] M-Tank « étude et réalisation d'un système de refroidissement-pour l'éléctronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluid conducteur électronique »Doctorat université de grenoble 2011.

[15] Lin-Lin, Min-xin dang , Xin-xin zhang, Numerical and parametric study of multilayered microchannel heat sinks 2015.

[16] M-Kloshvaght alibadi, M-sahamiya « performance of nanofluid flaw in corrugated minichannel heat sinks mchs »2016.

[17] X-umjia deng , shugang wang , jihong wang, tengfeii zhang « analytical modeling of microchannel heat sinks usings microencapsulated phase change material slurry for chip cooling 2017.

[18] B-Rajabifar « enhacement of the performance of a double layer microchannel heat sinks using PCM 2015.

[19] L-chai , L-wang , X-bai « thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with traingular ribs on sidewalls-part1-local fluid flow and heat transfert charcteristics 2018.

[20] A-Al-Rashed,A-shahsavar,O-Rasoali,M-Moghini, A-Karimipour,

M Ductyan « Numérical assessmentt into water-silver nanofluid in a wavy walled microchannel heat sinks 2019.

[21] W-Mounyan ,C-jho-yuting « Numérical study on convective heat tranfer of nanofluid in a minichannel heat sinks with micro-encapsulted PCM-cooled ceiling 2020.

[22] M-Mozafari , A-Lee ,J-Mohammadpour « thermal management of single and multiple PCMs bassed heat sinks for electronic cooling 2021.

[23] A-Kumar, C-Bakli « Interply of wettablity and confinnement enhaning the performance of heat sinks 2022.

[24] F-Naaman Ghadhban , H-mohammad jaffal « Numérical investigation on heat transfert and fluid flow in a multi-minichannel heat sinks effect of channel configuration 2023 .

[25] A-Maheswari , Y-Prajapati, Pbahandari,R-upadhyaya « experimental analyse of double layermicrochannel heat sink with distinct fin configuration in upper and lower layer 2024.

[26] ANA-MARIA BIANCHI , YVES FAUTR ELLE, JACQUELINE ETAY «TRANSFERTS THERMIQUES » ,Agence universitaire de la Francophonie PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, p 133.

[27] HABIB Hanane, BOUARSA Khedidja, « Etude numérique d'un dissipateur de chaleur», Mémoire Master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle,2023.

[28] André Titular « Les éléments finis de la théorie à la pratique », mathématique et de statique, école polytechnique de Montréal, Université Laval.

[29] Menni Youness « étude numérique comparative entre deux types de chicane et ailettes (Trapézoïdale et Triangulaire) utilisées Pour Améliorer les Performances des Capteurs Solaires Plans à Air », Université Tlemcen 14 juin 2012.

[30] Chapitre 3 «Méthode des Volumes Finis », Université Bisikra, http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre%2003.pdf.

[31] Mohammed Beggas, « Méthode de différences finies pour les équations aux dérivées partielles», Cours de prémière année master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, Faculté des Sciences Exactes, Département de Mathématiques.

[32] Alexei Stoukov« introduction à la mécanique des fluides numérique : méthode 'volumes finis'», Octobre 2006.

[33] Dr AMIRAT Mohamed & Dr BELOUFA Mohammed Amine, « Cours et applications de la méthode des éléments finis», Universitaire d'Ain Témouchent ,Faculté des Sciences et Technologie ,Département de Génie Mécanique, Polycopiés MEF 2021.

[34] BERDJI MOHAMED EL BACHIR & GHERIBI NOUREDDINE, «Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté de sciences appliquées, Département Génie Mécanique, 25/06/2019.

[35] Mr. ZAOUIA Mustapha, Mémoire De fin d'études, «Etude par la Méthode des Eléments Finis d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de Défauts dus à la Désaimantation », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,Faculté du Génie Electrique et de l'Informatique, Département d'Electrotechnique, Promotion 2009.

[36] DJIHANE HADI , «Etude de la convection d'un nano-fluide dans des microcanaux verticaux», Mémoire Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Département de génie mécanique,2020.

[37] RACHIDE BENZERAFA, - HAMZA CHOUIA. «Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement des nanofluides dans des microcanaux»,Mémoire Master, University Center of Abdalhafid Boussouf-MILA, Département Génie Mécanique & Electromécanique , 2022.

[38] K. Naga Ramesh, T. Karthikeya Sharma, G. Amba Prasad Rao , K. Madhu Murthy«Numerical Investigation on Thermal Performance of PCM-Based Hybrid Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling Application»,Arabian Journal for Science and Engineering (2023) 48:2779–2793.