



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

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

معهد الصيانة والأمن 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

**Thème**

**Etude numérique d'un dissipateur de chaleur**

Présenté et soutenu publiquement par :

**HABIB Hanane & BOUARSA Khedidja**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr MEGHDIR Abed	MAA	UNIV. D'ORAN 2	Président
Mr BOUHAMRI Noureddine	MAA	UNIV. D'ORAN 2	Encadrant
Mr BOUHAFS Mohamed	MCB	UNIV. D'ORAN 2	Examineur

Année 2022/2023

# 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, [BOUHAMRI Nouredine], 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.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire*

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

*A mon frère et ma sœur*

*A toute ma famille*

*A toutes mes amis de près ou de loin.*

*Khedidja*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire*

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

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A toutes mes amis de près ou de loin.*

*Hanane*

# Nomenclature

## Symboles Latins :

A	Surface d'échange thermique (m <sup>2</sup> ).
C <sub>p</sub>	La chaleur spécifique à pression constante (J/(kg.K)).
d	Diamètre des ailettes cylindriques (m).
d <sub>t</sub>	Diamètre de trou oblong vertical (m).
e <sub>b</sub>	épaisseur de base (cm).
e <sub>s</sub>	épaisseur de source (m).
F <sub>i</sub>	Représente les forces de volume suivant la direction i.
g	L'accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> ).
H	Hauteur d'ailette (m).
H <sub>a</sub>	Hauteur de trou oblong vertical (cm).
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection (W .m <sup>-2</sup> . °C <sup>-1</sup> ).
$\bar{h}$	Coefficient d'échange convectif moyenn
K	La conductivité thermique (W/ (m.K)).
K <sub>f</sub>	La conductivité du fluide (W/ (m.K)).
L	Longueur de dissipateur (m).
L <sub>f</sub>	La longueur selon laquelle se fait l'écoulement (cm).
$\dot{m}$	Débit massique, en (kg/s).
P	Périmètre (m).
Q	Source de chaleur (W).
q <sub>c</sub>	Quantité de chaleur.
R <sub>th</sub>	La résistance thermique.
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur (m <sup>2</sup> ).
T	Température (K).
T <sub>s</sub>	Température de surface du solide (°C).
T <sub>∞</sub>	Température du fluide loin de la surface du solide (°C).

$T_{\text{ext}}$	La température externe (°C).
$T_p$	La température des parois (°C).
$\bar{T}_{\text{out}}$	Température moyenne du fluide à la sortie (°C).
$\bar{T}_w$	Température moyenne de la surface d'échange (°C).
$T_0$	Température d'entrée (°C).
$\bar{T}_m$	Température moyenne de mélange basé sur la masse volumique (°C).
$\bar{T}_b$	Température moyenne de la base du dissipateur de chaleur (°C).
$U$	La vitesse (m/s).
$V$	Le volume du composant électronique (m <sup>3</sup> ).
$u, v, w$	Composante du vecteur vitesse suivant x, y, z.
$x, y, z$	Cordonnées cartésiennes

### Symboles grecs :

$\beta$	Le coefficient de dilabilité ou d'expansion thermique (1/K)
$\Phi$	Flux de chaleur transmis par convection (W).
$\alpha$	La diffusivité thermique (m <sup>2</sup> /s).
$\mu$	La viscosité respectivement dynamique (Pa · s).
$\nu$	La viscosité cinématique (m <sup>2</sup> /s).
$\rho$	La masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ).
$\varphi$	La fraction volumique des particules
$\sigma$	Constante de Stefan (W.m <sup>-2</sup> . K <sup>-4</sup> ).
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu (W m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )
$\varepsilon$	Facteur d'émission de la surface

### Nombres adimensionnels :

Re	Le nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho u_0 D_h}{\mu}$
Nu	Le nombre de Nusselt $\bar{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D_h}{K_f}$

# Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction général**

## **Chapitre I : Généralités sur les dissipateurs de chaleur & état de l'art**

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Transfert de chaleur .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.1. Modes de transfert de chaleur .....</b>	<b>2</b>
<b>I. 3. Aspects thermiques des composants électroniques .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.1. Caractéristiques thermiques .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2. L'échauffement des composants électroniques .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2.1. Causes de la surchauffe des composants électroniques .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2.2. Effets de la surchauffe des composants électroniques .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Les principales techniques de refroidissement utilisées en électronique .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.1. Refroidissement à air .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.2. Refroidissement par liquide caloporteur .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.3. Refroidissement par jets.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.4. Refroidissement par spray .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.5. Refroidissement par caloducs .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5. Les dissipateurs de chaleur .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1. Les dissipateurs de chaleur à ailettes .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1.1. Les ailettes .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1.2. Les différents types des ailettes.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.3. Choix des ailettes.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.2. Différents types de dissipateurs de chaleur .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.2.1. Dissipateurs de chaleur actifs .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.2.2. Dissipateurs de chaleur passifs .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.2.3. Dissipateur de chaleur en aluminium.....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.4. Dissipateurs de chaleur estampés .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.5. Dissipateurs de chaleur à ailettes collées.....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.6. Dissipateurs de chaleur à ailettes pliées .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.7. Dissipateurs de chaleur Skived .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.8. Dissipateurs de chaleur forgés .....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.2.9. Dissipateurs de chaleur à une seule ailette.....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.2.10. Dissipateurs thermiques sertis .....</b>	<b>14</b>

I.6.État de l'art.....	14
I.7.Conclusion .....	21

## **Chapitre II : Notions sur les écoulements &Formulation Mathématique**

II.1. Introduction .....	22
II.2 Introduction sur la Convection .....	22
II.2.1 Convection forcé.....	22
II.3 Régime d'écoulement .....	23
II.4. Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur .....	24
II.5. Eléments mathématiques de base (équations gouvernantes).....	25
II.5.1. L'équation de continuité.....	25
II.5.2. Les équations de quantité de mouvement .....	25
II.5.3. L'équation de l'énergie .....	26
II.6. Hypothèses simplificatrices .....	26
II.7. Equations dimensionnelles .....	27
II.8. Calcul des grandeurs Hydrodynamique et Thermique .....	28
II.8.1. Le diamètre hydraulique .....	28
II.8.2. Nombre de Reynolds .....	28
II.8.3. Coefficient d'échange convectif h .....	28
II.8.4. Le nombre de Nusselt.....	29
II.8.5. La Résistance thermique.....	29
II.9. Conclusion.....	30

## **Chapitre III : Résultats et Discussions**

III.1. Introduction.....	31
III.2. Présentation de logiciel de simulation.....	31
III.2.1 Présentation du COMSOL.....	31
III.2.2. Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics .....	32
III.2.4. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 6.0.....	32
III.2.5. Création du modèle de simulation.....	34
III.2.6. Maillage .....	35
III.2.7. Simulation et traitement des résultats .....	35
III.3. Géométries de Problème Considéré .....	36
III.4. Conditions aux limites .....	37

<b>III.5. Paramètres utilisés</b> .....	38
<b>III.6. Effet de Maillage</b> .....	39
<b>III.6.1. Test de convergence</b> .....	40
<b>III.7. Résultats et discussions</b> .....	41
<b>III.7.1. Pour l'eau</b> .....	41
<b>III.7.1.1. Etude du profil de température</b> .....	41
<b>III.7.1.2. Champs de vitesse, lignes de courant et contours</b> .....	45
<b>III.7.1.3. Contours de pression</b> .....	50
<b>III.7.1.4. Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds</b> .....	52
<b>III.7.2. Pour les nano-fluides</b> .....	52
<b>III.7.2.1. Etude du profil de température</b> .....	52
<b>III.7.2.2. Comparaison de l'eau et les nano-fluides</b> .....	55
<b>III.8. Etude de cas</b> .....	56
<b>III.8.1. Dissipateur de chaleur à ailettes à plaques</b> .....	56
<b>III.8.2. Etude du profil de température</b> .....	57
<b>III.8.3. Comparaison entre les ailettes cylindriques et plaques</b> .....	59
<b>III.9. Conclusion</b> .....	60

## **Conclusion générale**

## Listes des figures

<i>Figure I.1 : Transfert thermique entre deux surfaces (<math>T_2 &gt; T_1</math>)</i> .....	3
<i>Figure I.2 : Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection</i> .....	4
<i>Figure I.3 : Le principe du rayonnement thermique</i> .....	4
<i>Figure I.4 : Système de refroidissement par air</i> .....	7
<i>Figure I.5 : La pompe piézoélectrique et son principe de fonctionnement</i> .....	8
<i>Figure I.6 : Refroidissement liquide à plaque froide</i> .....	8
<i>Figure I.7 : Refroidissement par convection dans des canaux</i> .....	9
<i>Figure I.8. Différents types de dissipateurs de chaleur</i> .....	12
<i>Figure II.1 : Exemple d'écoulements laminaires et turbulents</i> .....	24
<i>Fig. III.1: Interface utilisateur de COMSOL 6.0</i> .....	33
<i>Fig. III.2 : Création du modèle dans Comsol 6.0</i> .....	34
<i>Fig. III. 3 : État du modèle avant de simuler</i> .....	35
<i>Fig. III.4: Résultat de la simulation</i> .....	36
<i>Fig. III.5: Vue isométrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes pleines.</i> .....	37
<i>Fig. III.6: Maillage</i> .....	39
<i>Fig. III.7 : Comparaison de température en maillage extrêmement grossier et maillage normale</i> .....	40
<i>Fig. III.8 : Test de convergence</i> .....	41
<i>Fig. III.9 : Distribution de champ de température sur le long de dissipateur à ailettes cylindriques pleines pour différents nombre de Reynolds</i> .....	42
<i>Fig. III.10 : Les contours de la température dans un dissipateur de chaleur pour différent nbr de Reynold</i> .....	44
<i>Fig. III.11 : Variation de température en fonction de nombre de Reynolds dans dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques dans différentes positions</i> .....	44
<i>Fig. III.12: Champs de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.</i> .....	46
<i>Fig. III.13: Les lignes de courant dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds</i> .....	48
<i>Fig. III.14: Vue isométrique des contours de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.</i> .....	49
<i>Fig. III.15: Vue isométrique des flèches en volume de vitesse « velocity field » dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds</i> .....	50
<i>Fig. III.16: Vue isométrique des contours de pression dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.</i> .....	51
<i>Fig. III.17: Variation du nombre de Nusselt dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines en fonction du nombre de Reynolds</i> .....	52
<i>Fig. III.18 : Vue isométrique des contours de température pour nano fluide (eau+ <math>TiO_2</math>) à différent nombre de Reynolds</i> .....	54

<i>Fig. III.19: Vue isométrique des contours de température pour nano fluide (eau+ cuivre) à différent nombre de Reynolds .....</i>	55
<i>Fig. III.20: Comparaison de la variation du nombre de Nusselt en fonction .....</i>	55
<i>du nombre de Reynolds de l'eau et les deux nano-fluides : eau + Cu et eau +TiO<sub>2</sub>. .....</i>	55
<i>Fig. III.21 : Vue isométrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes plaques. ....</i>	57
<i>Fig.III.22. Distribution de champ de température sur le long de dissipateur à ailettes à plaques pour différents nombres de Reynolds.....</i>	58
<i>Fig.III.23. Champs de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes à plaques pour différent nombre de Reynolds.....</i>	59

### **Listes des tableaux**

<i>Tableau III.1 : propriétés physiques du (eau + cuivre) avec 9% .....</i>	39
<i>Tableau III.2 : propriétés physiques du (eau + TO<sub>2</sub>) avec 9%.....</i>	39
<i>Tableau III.3 : Statistique et résultat de maillage extrêmement grossier.....</i>	40
<i>Tableau III.4 : Les dimensions de la géométrie étudiée.....</i>	56

## Résumé

L'étude analyse les performances de refroidissement d'un dissipateur de chaleur équipé d'ailettes cylindriques. Deux types de fluides sont utilisés : l'eau pure et des nano-fluides composés d'eau mélangée à des particules de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) et de Cuivre (Cu). Les performances de refroidissement sont évaluées à différents nombres de Reynolds : Re=100, 300 et 500.

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL, un logiciel de modélisation et de simulation multiphysique. Les résultats obtenus permettent de comparer les différentes configurations de refroidissement en fonction des fluides utilisés et des nombres de Reynolds.

Les nano-fluides, en raison de la présence de particules de TiO<sub>2</sub> et de Cuivre, peuvent présenter des propriétés thermiques améliorées par rapport à l'eau pure

L'objectif de l'étude est d'analyser et de comparer les performances de refroidissement des différentes configurations afin de déterminer laquelle offre les meilleures performances, l'étude peut fournir des informations précieuses en fonction des fluides utilisés et des nombres de Reynolds. Ces informations peuvent être utilisées pour optimiser la conception des dissipateurs de chaleur et améliorer leur efficacité de refroidissement dans diverses applications.

**Mots clés :** Nano-fluide, ailettes cylindriques pleins, chaleur, refroidissement

## المخلص

تحلل الدراسة أداء تبريد المشتت الحراري بزعانف أسطوانية يتم استخدام نوعين من السوائل: الماء النقي والموائع النانوية المكونة من الماء الممزوج بجزيئات Cu و TiO<sub>2</sub> تم تصنيف أداء التبريد وفقاً لقيم رينولدز المختلفة 100, 300, 500.

تم استخدام برنامج COMSOL لإجراء عملية المحاكاة العددية باستخدام برنامج وهو برنامج محاكاة ونمذجة متعددة الفيزياء. تتيح النتائج التي تم الحصول عليها بمقارنة تكوينات التبريد المختلفة وفقاً للموائع المستخدمة وقيم رينولدز يمكن أن تظهر الموائع النانوية نظراً لوجود جزيئات Cu و TiO<sub>2</sub> خصائص حرارية محسنة مقارنة بالمياه النقية الهدف من الدراسة هو تحليل ومقارنة أداء التبريد اعتماداً على السوائل المستخدمة للتكوينات المختلفة وأرقام رينولدز لتحديد أيهما يقدم أفضل أداء يمكن استخدام هذه المعلومات لتحسين تصميم أحواض الحرارة وتحسين كفاءة التبريد في

**الكلمات المفتاحية :** تبريد, التطبيقات المختلفة سائل نانو, زعانف أسطوانية صلبة, حرارة

## **Abstract**

The study analyzes the cooling performance of a heat sink equipped with cylindrical fins. Two types of fluids are used: pure water and nanofluids composed of water mixed with particles of TiO<sub>2</sub> and copper (Cu). Cooling performance is rated at different Reynolds numbers: Re=100, 300 and 500.

Numerical simulations were performed using COMSOL software, a multiphysics modeling and simulation software. The results obtained make it possible to compare the different cooling configurations according to the fluids used and the Reynolds numbers.

Nanofluids, due to the presence of TiO<sub>2</sub> and Copper particles, can exhibit improved thermal properties compared to pure water

The objective of the study is to analyze and compare the cooling performance of different configurations to determine which offers the best performance, the study can provide valuable information depending on the fluids used and the Reynolds numbers. This information can be used to optimize the design of heat sinks and improve their cooling efficiency in various applications.

**Keywords :** Nano-fluid, solid cylindrical fins, heat, cooling



## **Introduction générale**

Les dissipateurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines où la dissipation de la chaleur est cruciale pour assurer le bon fonctionnement des systèmes électroniques, industriels et mécaniques. Ces dispositifs permettent de transférer la chaleur générée par une source vers l'environnement afin d'éviter toute surchauffe et d'éventuels dysfonctionnements.

### **Chapitre 1 : Généralités et état de l'art**

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des dissipateurs de chaleur, en mettant l'accent sur les principes de base du transfert de chaleur. Nous examinerons les différents modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et les types de dissipateur de chaleur

Nous passerons ensuite en revue l'état de l'art des dissipateurs de chaleur, en explorant les avancées récentes dans le domaine. Cela comprendra l'utilisation de matériaux à haute conductivité thermique ainsi que l'intégration de techniques avancées de refroidissement

### **Chapitre 2 : Formulation mathématique**

Dans ce deuxième chapitre, nous présenterons les équations qui gouvernent le phénomène de la convection en régime laminaire, Nous discuterons également des des équations aux dérivées partielles qui modélisent les processus de transfert de chaleur dans les dissipateurs.

### **Chapitre 3 : Simulation et résultats avec le logiciel COMSOL**

Dans ce troisième chapitre, nous mettrons en pratique les concepts discutés précédemment en réalisant des simulations numériques à l'aide du logiciel COMSOL et Nous présenterons les résultats obtenus

En conclusion, ce travail de recherche fournira une base solide pour comprendre les dissipateurs de chaleur, en couvrant les aspects théoriques, mathématiques et pratiques. Les connaissances et les résultats obtenus grâce à cette étude pourront être utilisés pour concevoir et améliorer les dissipateurs de chaleur dans diverses applications industrielles et électroniques.

# Chapitre I

Généralités sur les dissipateurs de  
chaleur & état de l'art

## **I.1.Introduction**

Le refroidissement des composants électroniques est une étape importante pour assurer le bon fonctionnement et la durée de vie des équipements électroniques. Les composants électroniques génèrent de la chaleur en fonctionnement en raison de la résistance de leurs circuits. Si cette chaleur n'est pas éliminée efficacement, elle peut endommager les composants, réduire les performances et finalement causer des pannes.

Il existe plusieurs moyens de refroidir les composants électroniques tels que la convection naturelle, la convection forcée, le refroidissement par immersion et le refroidissement par micro-canaux. Les méthodes de refroidissement utilisées dépendent de la puissance thermique produite par le composant et des limitations physiques telles que l'espace disponible, les coûts et la complexité.

Les principaux composants électroniques qui nécessitent une dissipation thermique efficace comprennent les processeurs, les cartes graphiques, les sources d'alimentation et les disques durs. Les fabricants de ces composants ont souvent des recommandations pour le refroidissement efficace de leurs produits, qui peuvent inclure l'utilisation de dissipateurs thermiques, de ventilateurs de refroidissement ou de pâtes thermiques pour améliorer la conductivité thermique entre les composants et les dissipateurs.

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

Le transfert de chaleur est un processus important dans de nombreux domaines de l'industrie et de la technologie, car il est souvent nécessaire de 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.

### **I.2.1. Modes de transfert de chaleur**

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

- **Conduction**

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

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

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

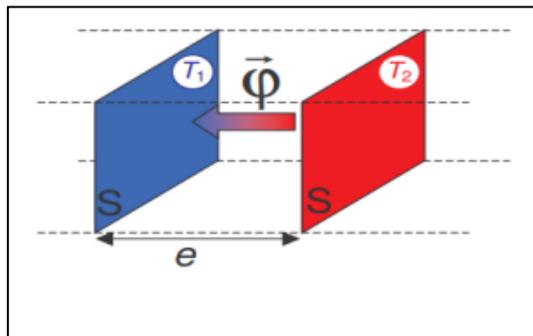


Figure I.1 : Transfert thermique entre deux surfaces ( $T_2 > T_1$ ). [3].

- **La convection**

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

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

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

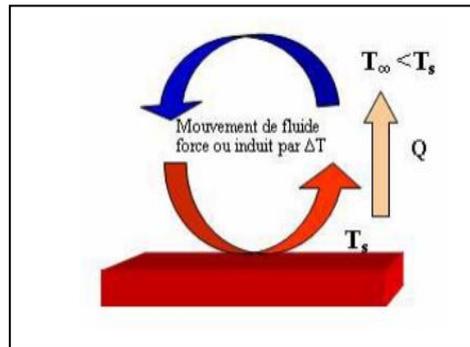


Figure I.2 : Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection [4].

- **Rayonnement**

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

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

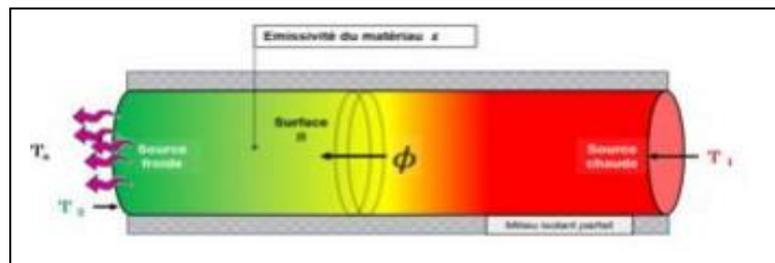


Figure I.3 : Le principe du rayonnement thermique [2].

## I. 3. Aspects thermiques des composants électroniques

### I.3.1. Caractéristiques thermiques

- **Les composants à semi-conducteur**

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité entre les conducteurs (généralement les métaux) et les non-conducteurs ou les isolants (comme la plupart des céramiques). Ils peuvent être des éléments purs ou des composés, et ils ont un domaine de température de fonctionnement limité par la nature du matériau semi-conducteur et par le type de technologie employé lors de leur fabrication [6].

Ces composants sont placés dans des boîtiers hermétiques : TO5, TO36, plat céramique, plastique...etc. Une très grande partie de l'énergie fournie est dissipée sous forme thermique au niveau de la jonction. Cette chaleur traverse presque en totalité la pastille puis la liaison pastille-boîtier et enfin le corps du boîtier par conduction [7].

- **Tubes cylindriques**

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

Les tubes à vide utilisent une émission thermoélectrique principale dans laquelle un métal est chauffé, ce qui permet de desserrer les électrons. Cela provoque la charge positive des anodes pour attirer les électrons négatifs émis par les cathodes en provoquant un flux de courant électrique dans l'anode et hors de la cathode [8].

### **I.3.2. L'échauffement des composants électroniques**

Les composants électroniques tels que les circuits intégrés, les résistances et les condensateurs, entre autres, sont conçus et construits pour résister à des quantités ou des niveaux de chaleur particuliers. Ils produisent de la chaleur en tant que sous-produit du fonctionnement normal. Outre, différentes situations internes et externes peuvent entraîner une surchauffe susceptible d'endommager un composant électronique [9].

#### **I.3.2.1. Causes de la surchauffe des composants électroniques**

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

Les appareils électroniques compacts à grande puissance et les composants électroniques miniaturisés sont susceptibles de surchauffer en raison de la petite surface et de la dimension limitée qui rend le transfert de chaleur moins efficace (plus les électrons sont emballés dans un petit morceau de semi-conducteur, plus les électrons dispersent les phonons ce qui empêche les phonons d'emporter la chaleur). D'autres exemples de problèmes de conception et d'ingénierie sont le câblage de contact défectueux et le couplage métaphysique, et le manque de contrôle de la qualité et de l'évaluation pendant la production des appareils électroniques [10].

- **Les facteurs environnementaux**

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

Les autres causes de surchauffe sont les mauvais contacts externes et le mauvais câblage qui peuvent entraîner des surtensions excessives et une dissipation de puissance, et l'utilisation inappropriée d'un appareil électronique comme l'utilisation d'un dispositif auxiliaire incompatible (l'utilisation de câbles et d'adaptateurs d'alimentation non synchronisés, l'over-clocking des composants matériels des dispositifs informatiques, le stockage inapproprié et l'utilisation abusive...etc.) [9].

### **I.3.2.2. Effets de la surchauffe des composants électroniques**

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

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

Les effets secondaires sont la dégradation matérielle des constituants réels et la défaillance subséquente du composant électronique. Les changements dans les propriétés physiques et chimiques affectent la performance ou en d'autres termes, le fonctionnement et la fonction d'un composant électronique [9].

## **I.4. Les principales techniques de refroidissement utilisées en électronique**

Pour résoudre les problèmes thermiques susceptibles d'affecter le fonctionnement normal des circuits électroniques, un refroidissement efficace est utilisé pour améliorer la fiabilité et éviter une panne prématurée. Lors du choix d'une technique de refroidissement, huit facteurs doivent être pris en compte : taille, coût, efficacité thermique, bruit, vibration, maintenance et interférences électriques avec des composants d'équipements électroniques.

### I.4.1. Refroidissement à air

La technologie de refroidissement par air est l'une des technologies les plus courantes et les plus utilisées. L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur en contact avec le dissipateur thermique par impulsion (convection forcée) ou naturelle (convection naturelle) [11].

#### • Convection Naturelle à air

Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur dimensionné suivant la surface de refroidissement. La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. Ce dispositif est toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium) [11].

#### • Convection forcée à air

Le soufflage d'air forcé par un ventilateur est la méthode la plus largement utilisée dans refroidissement des composants électroniques pour sa simplicité de mise en œuvre, son coût et sa stabilité. L'air est mis en mouvement par un générateur de flux tel que montré dans l'exemple de la figure ci-dessous [12].

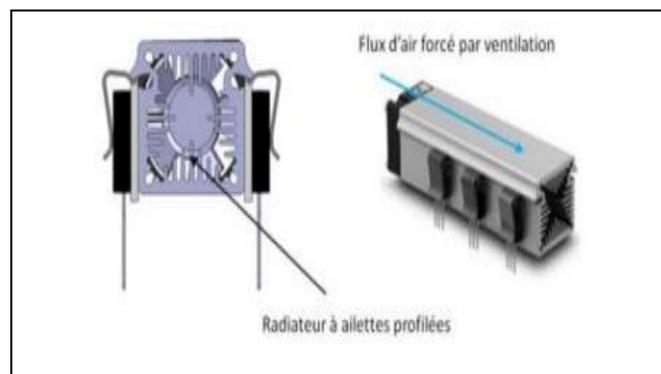


Figure I.4 : Système de refroidissement par air [12].

#### • La pompe piézoélectrique

La pompe à air piézoélectrique dite « dual piezo cooling jet » est un dispositif micro-fluidique se compose de deux disques de nickel reliés de chaque côté par un matériau piézoélectrique La céramique alimenté par un courant alternatif. Cet appareil est silencieux et ne nécessite pas un moteur. Il est mince et consomme moins d'énergie que les ventilateurs conventionnels [12].

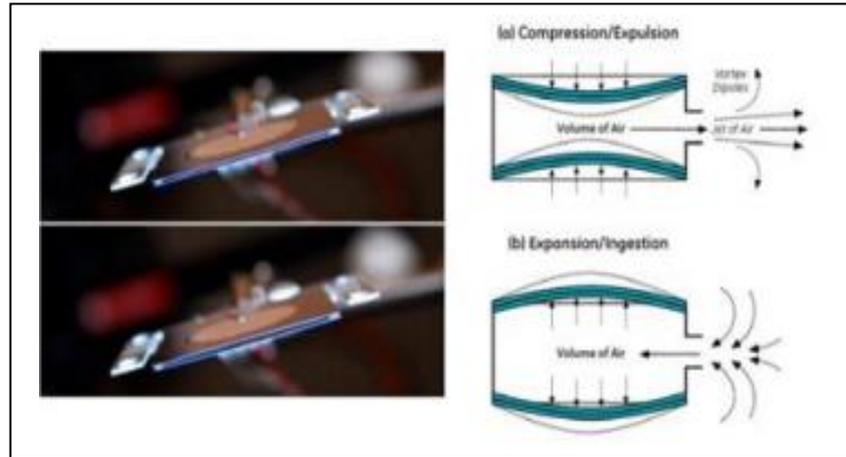


Figure 1.5 : La pompe piézoélectrique et son principe de fonctionnement [12].

#### I.4.2. Refroidissement par liquide caloporteur

La valeur du coefficient d'échange convectif  $h$  est limitée dans le cas de l'air car faible conductivité thermique. Cependant, l'air peut être remplacé par un autre liquide pour augmenter la valeur de  $h$  et donc la puissance est évacuée. Dans des nombreux cas, le liquide utilisé est de l'eau. Cela est dû à sa très bonne dissipation thermique, sa conductivité thermique est Facile à utiliser. Dans d'autres cas, des fluides diélectriques peuvent également être utilisés tels que fluorinert, midel, R12 [13].

##### • Refroidissement par plaque à eau

Le refroidissement liquide est mis en œuvre dans les composants électroniques sous la forme d'une plaque d'eau dans laquelle circule un fluide caloporteur ou canalise un fluide mural à rafraîchir. Un système composé principalement d'une pompe et d'un échangeur de chaleur contenu dans un liquide qui transfère la chaleur vers l'extérieur serveur [14].

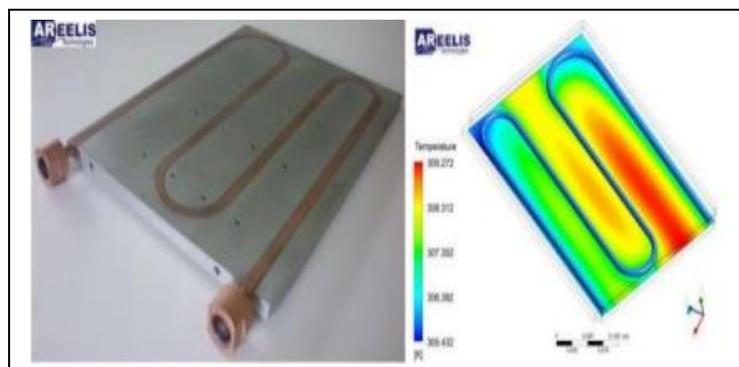


Figure 1.6 : Refroidissement liquide à plaque froide [14].

### •Refroidissement par canaux

Le refroidissement avec des canaux mini et microphone en fait un support très amusant à. En la gestion thermique de l'électronique de puissance. Effet la densité de flux de chaleur de centaines de  $w/cm^2$  peuvent être éliminés grâce à cette technique. Mini et micro canal peut se présenter sous une forme plus ou moins complexe selon l'effet recherché et la technologie du la production est utilisée. La forme la plus simple est formée par des canaux rectangulaires axiaux parallèle [15].

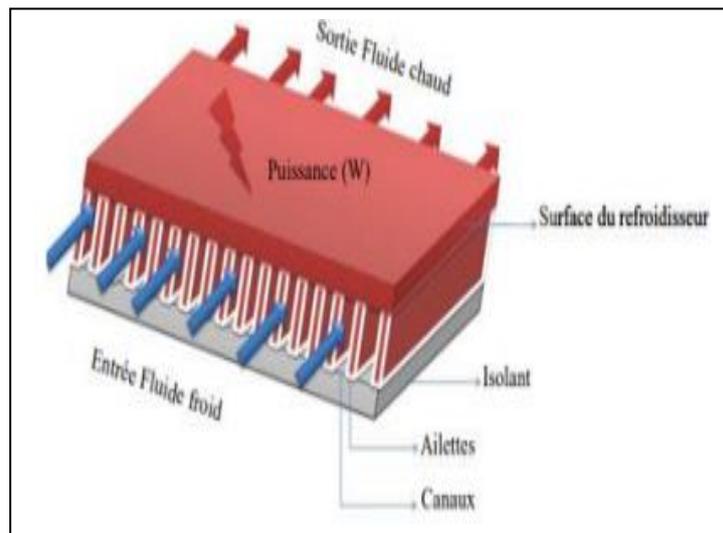


Figure I.7 : Refroidissement par convection dans des canaux [15].

### I.4.3. Refroidissement par jets

Le refroidissement par jet d'eau est une solution privilégiée dans les applications industrielles lorsque les gens cherchent à éliminer ou à provoquer une énorme quantité de chaleur sur les surfaces. Cette technique largement utilisée en aéronautique pour refroidir les hélices des turbines ou chambre de combustion d'un moteur de nouvelle génération

Dans le domaine de l'électronique, une augmentation permanente de la puissance dissipée par Les composants modernes et les soucis constants de compacité ont conduit à la nécessité de trouver solution efficace au problème d'extraction de chaleur en milieu confiné [16].

### I.4.4. Refroidissement par spray

La technologie de refroidissement par spray est largement utilisée dans refroidissement dans l'électronique et l'électronique de puissance, en raison de son efficacité à

dissiper grand flux de chaleur sur petite surface. Il consiste à pulvériser un liquide (eau ionisée ou réfrigérants tels que PF-5060 et R134a) sur des surfaces chaudes pour froideur. La pulvérisation peut être effectuée en pressurant le liquide ou en utilisant de l'air comprimé [17].

#### **I.4.5. Refroidissement par caloducs**

Le caloduc est un système de refroidissement diphasique qui tire parti du changement de phase d'un fluide caloporteur, prenant la chaleur d'un point et la transportant à un autre sans l'utilisation de pompes ou d'autres équipements mécaniques. Il se compose d'une enceinte hermétiquement fermée avec Les parois internes sont recouvertes d'un réseau capillaire saturé de fluide. En général se compose de trois parties appelées évaporateur, condenseur et zone adiabatique et il est caractérisée par : une conductivité thermique très élevée, une activité semi-isotherme et contrôle de la température [18].

### **I.5. Les dissipateurs de chaleur**

Un dissipateur thermique est un dispositif destiné à évacuer la chaleur résultante de l'effet Joule dans un élément semi-conducteur d'électronique de puissance. Il s'agit de dispositifs généralement munis d'ailettes, qui doivent de préférence être montées verticalement pour faciliter le refroidissement par convection.

#### **I.5.1. Les dissipateurs de chaleur à ailettes**

##### **I.5.1.1. Les ailettes**

L'ailette est un dispositif thermique utilisé pour accélérer le transfert de chaleur en convection. Son rôle est d'améliorer l'évacuation de la chaleur d'un système solide limité où la densité de flux de chaleur est élevée.

Selon la formule de transfert de chaleur par convection, le taux de transfert de chaleur est proportionnel la surface en contact avec le milieu de convection. Par conséquent, l'ailette augmenter la surface en contact avec les véhicules. La transition entre fin et La paroi se fait par conduction, tandis que l'échange avec le fluide extérieur se fait par convection [19].

L'importance des ailettes, même si leur forme peut être très variable, elles sont tout de même indispensables pour améliorer les performances de tout échangeur de chaleur. Que l'objectif soit de refroidir un élément en transférant sa chaleur à l'air ambiant, ou

à l'inverse en chauffant le liquide en une résistance, le principe des échangeurs reste toujours le même et l'ailette y reste presque toujours liés [20].

### I.5.1.2. Les différents types des ailettes

Dans les domaines d'application de la technologie, il existe plusieurs formes et configurations ailettes [21] :

- **Les ailettes droites** : C'est la géométrie la plus simple qui a fondamentalement Le but d'augmenter la surface d'échange. Les canaux de base peuvent être rectangle ou triangle
- **Les ailettes droites perforées** : les trous permettent au fluide de communiquer entre les canaux pour normaliser les échanges et créer une agitation turbulente.
- **Les ailettes ondulées** : Elles permettent de réduire un peu la géométrie par rapport à avoir des ailettes droites. L'angle doit rester suffisamment faible pour empêcher la séparation produit une perte d'énergie sans améliorer l'efficacité thermique.
- **Les ailettes en épingles** : les épingles permettent d'augmenter la surface s'échangent et créent des mélanges et des turbulences. Cet appareil est couramment utilisé.
- **Les ailettes à pas décalé** : Ces ailettes ont essentiellement la même surface d'échange de chaleur que les ailettes droites mais leur disposition décalée permet de créer des turbulences, et augmenter le nombre de régions qui forment la couche limite, ce qui est bénéfique pour l'échange de chaleur.
- **Les ailettes persiennes** : Ce sont des canaux avec des volets à travers lesquels le liquide peut circuler. Une partie des volets est disposée dans un sens et un peu plus loin dans l'échangeur, l'inclinaison des volets est inversée. Dans ce cas aussi la surface échange conservé (par rapport aux ailettes droites) et de la turbulence et du mélange est ensuite créé par les volets (les persiennes) [21].

### I.5.1.3. Choix des ailettes

Les ailettes sont utilisées lorsqu'il est nécessaire d'extraire une densité de flux élevée en une seule petite empreinte. Ils sont moins couramment utilisés pour les liquides car  $h$  est grand et utile dans le cas de gaz parce que  $h$  est faible. Des ailettes étroites et rapprochées mieux que de grandes ailettes régulièrement espacées mais on est limité par les pertes de charge (elles augmentent si on réduit trop la distance ailette). Plus l'ailette est efficace, mieux c'est car sa conductivité thermique est élevée [22].

### I.5.2. Différents types de dissipateurs de chaleur

Les dissipateurs sont divisés en différentes catégories. Considérons les principaux types, à savoir les dissipateurs de chaleur actifs et les dissipateurs de chaleur passifs.

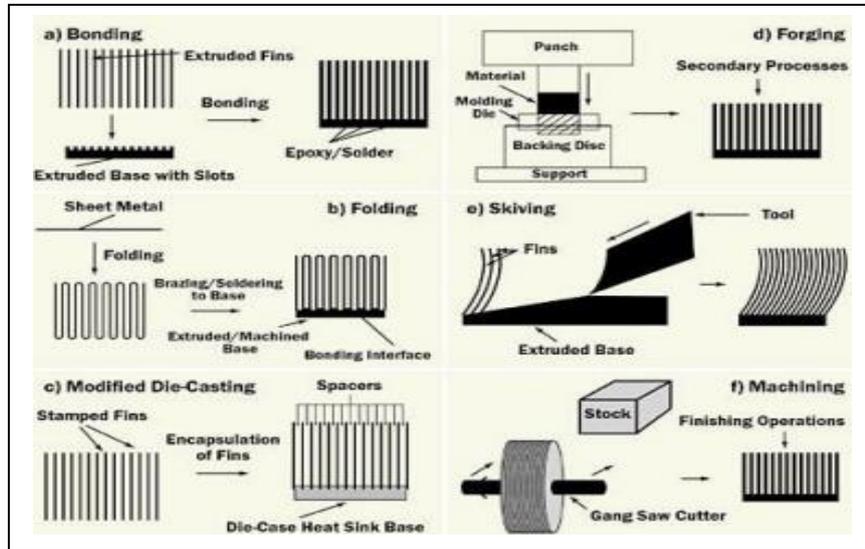


Figure 1.8. Différents types de dissipateurs de chaleur

#### I.5.2.1. Dissipateurs de chaleur actifs

Les Dissipateurs de chaleur actifs sont généralement de type ventilateur qu'utilise l'énergie pour le refroidissement, appelés dissipateurs thermiques ou ventilateurs. Le ventilateur est divisé en type à roulement à billes et type à roulement à Manchon. Les ventilateurs de moteur à roulement à billes sont préférés en raison de leur longévité Les heures de travail sont plus longues et les coûts sont inférieurs lorsqu'ils sont utilisés à distance. Ces types de dissipateurs thermiques fonctionnent très bien, mais ne conviennent pas pour Application à long terme car ils sont constitués de pièces mobiles et aussi un peu coûteux [23].

#### I.5.2.2. Dissipateurs de chaleur passifs

Ils n'ont pas de composants mécaniques et comprennent des radiateurs ailettes en aluminium. Ils dissipent l'énergie thermique ou la chaleur en utilisant processus de convection. Ils sont plus fiables que les dissipateurs thermiques actifs, pour le fonctionnement efficace du dissipateur thermique passif, devrait maintenir un flux d'air constant à travers leurs ailettes [23].

### **I.5.2.3. Dissipateur de chaleur en aluminium**

Les dissipateurs de chaleur sont généralement constitués de métaux ; et, l'aluminium est le métal le plus couramment utilisé dans le dissipateur de chaleur. Nous sommes conscients du fait que la conductivité thermique de chaque métal est différente. La conductivité thermique du métal est proportionnelle au transfert de chaleur dans le dissipateur de chaleur. Ainsi, si la conductivité thermique du métal augmente, la capacité de transfert de chaleur du dissipateur thermique augmentera également [23].

### **I.5.2.4. Dissipateurs de chaleur estampés**

Ceux-ci sont faits de métaux qui sont estampés pour former une forme particulière. Ce tampon crée les dissipateurs de chaleur chaque fois que le métal est déplacé à travers la machine à estamper. Ceux-ci sont moins chers que les dissipateurs de chaleur extrudés. Ces dissipateurs sont utilisés pour les applications à faible puissance et par conséquent, ils sont peu performants [23].

### **I.5.2.5. Dissipateurs de chaleur à ailettes collées**

Ils sont souvent utilisés pour de grandes applications physiques exigeant de performance sensibles telles que les applications de soudage électrique et de brasage. Brique DC-DC. Ils sont fabriqués en collant des ailettes métalliques individuelles à la base d'un dissipateur. Cela peut être fait par deux méthodes à savoir l'époxy thermique dont l'un est économique et l'autre par brasage coûteux [23].

### **I.5.2.6. Dissipateurs de chaleur à ailettes pliées**

Ces dissipateurs thermiques à ailettes pliées ont une grande surface et les dissipateurs se plient, et sont donc très efficaces et une densité de flux de chaleur très élevée. Dans ces éviers l'air est dirigé vers coule directement dans le dissipateur à travers un tuyau. Ça fait tout coûteux car les coûts de fabrication et de tuyauterie sont inclus dans le coût total de l'évier [23].

### **I.5.2.7. Dissipateurs de chaleur Skived**

Le processus Skiving utilisé pour fabriquer ces éviers comprend produit des blocs de métal très fins, généralement du cuivre. Ce sont donc appelés dissipateurs thermiques déformés. Ce sont des dissipateurs de chaleur de moyenne à haute performance [23].

### **I.5.2.8. Dissipateurs de chaleur forgés**

Des métaux tels que le cuivre et l'aluminium sont utilisés pour former le dissipateur de chaleur en utilisant les forces par compression. Ce processus est appelé forgeage. Par conséquent, ils sont appelés dissipateurs thermiques forgés [23].

### **I.5.2.9. Dissipateurs de chaleur à une seule ailette**

Il est léger et peut être installé dans des espaces restreints. Ils possèdent également de faibles performances et peut être utilisé pour de nombreuses applications. Mais le principal inconvénient est qu'ils ne sont pas chers [23].

### **I.5.2.10. Dissipateurs thermiques sertis**

L'estampage est un processus de forgeage à froid, mais peut parfois même être effectué comme un processus de travail à chaud, où la taille de l'empreinte est changée en matrice. Ces radiateurs sont peu coûteux, moyennement efficaces et avec un débit d'air limité [23].

## **I.6.État de l'art**

En 2012 : Étude expérimentale et numérique de l'effet des ailettes sur la performance des dissipateurs de chaleur" (Experimental and numerical study of the effect of fins on heat sink performance) Cette étude a été menée par des chercheurs de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en France Ils ont étudié l'effet des ailettes sur la performance des dissipateurs de chaleur en utilisant à la fois des simulations numériques et des expériences. Ils ont constaté que l'ajout d'ailettes peut améliorer considérablement la performance du dissipateur de chaleur [24].

-Conception et évaluation de dissipateurs de chaleur à base de graphène" (Design and evaluation of graphene-based heat sinks) - Cette étude a été menée par des chercheurs de l'Université de Californie à Riverside. Ils ont conçu et évalué des dissipateurs de chaleur à base de graphène, un matériau connu pour sa conductivité thermique élevée. Ils ont constaté que les dissipateurs de chaleur à base de graphène ont une performance supérieure à celle des dissipateurs de chaleur traditionnels [25].

-Analyse thermique et conception de dissipateurs de chaleur pour les circuits intégrés à haute performance" (Thermal analysis and design of heat sinks for high-performance integrated

circuits) - Cette étude a été menée par des chercheurs de l'Université de Californie à Berkeley. Ils ont analysé les contraintes thermiques des circuits intégrés à haute performance et ont conçu des dissipateurs de chaleur pour les protéger contre la surchauffe. Ils ont constaté que la conception de dissipateurs de chaleur adaptés aux contraintes thermiques spécifiques des circuits intégrés peut considérablement améliorer leur performance et leur durée de vie [26].

En 2013, de nombreux travaux ont été menés sur les dissipateurs de chaleur dans différents domaines tels que l'électronique, l'ingénierie thermique et la physique. Voici quelques travaux publiés sur ce sujet cette année-là : "Etude de l'efficacité des dissipateurs de chaleur à ailettes" par Y. Zhang, Z. Li et X. Luo - Cette étude visait à évaluer l'efficacité des dissipateurs de chaleur à ailettes en utilisant des modèles mathématiques et des simulations numériques. Les résultats ont montré que les dissipateurs de chaleur à ailettes étaient plus efficaces que les dissipateurs de chaleur sans ailettes [27].

"Conception d'un dissipateur de chaleur pour les systèmes de stockage d'énergie" par S. Chen, L. Huang et J. Zhang - Ce travail présentait la conception d'un dissipateur de chaleur pour les systèmes de stockage d'énergie à haute densité. Le dissipateur de chaleur a été conçu en utilisant une combinaison de modèles numériques et d'expériences [28].

"Analyse thermique et conception de dissipateurs de chaleur pour les LED haute puissance" par T. Ohno, T. Hashimoto et K. Nakamura - Cette étude présentait l'analyse thermique et la conception de dissipateurs de chaleur pour les LED haute puissance. Les chercheurs ont utilisé des simulations numériques pour optimiser la conception du dissipateur de chaleur et ont obtenu des résultats prometteurs [29].

"Caractérisation thermique d'un dissipateur de chaleur pour les microprocesseurs" par H. Li, X. Wang et Y. Chen - Ce travail présentait la caractérisation thermique d'un dissipateur de chaleur pour les microprocesseurs. Les chercheurs ont utilisé des techniques expérimentales pour mesurer les propriétés thermiques du dissipateur de chaleur et ont obtenu des résultats intéressants [30].

En 2014, plusieurs travaux de recherche ont été menés sur les dissipateurs de chaleur, notamment :

-Une étude sur les performances thermiques des dissipateurs de chaleur en aluminium et en cuivre dans les ordinateurs portables (source : International Journal of Thermal Sciences) [31].

-Une analyse numérique et expérimentale de l'effet des ailettes en spirale sur la performance des dissipateurs de chaleur (source : Applied Thermal Engineering) [32].

-Une étude sur l'effet de la forme des ailettes sur la performance des dissipateurs de chaleur en cuivre pour les applications de refroidissement de l'électronique de puissance (source : IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology) [33].

-Une analyse comparative de la performance des dissipateurs de chaleur en aluminium et en acier inoxydable dans les systèmes de refroidissement des voitures (source : Applied Thermal Engineering) [32].

-Une étude expérimentale sur l'efficacité de différents types de fluides de refroidissement dans les dissipateurs de chaleur (source : Journal of Electronic Packaging) [34].

Ces travaux de recherche ont contribué à l'avancement des connaissances sur les dissipateurs de chaleur et ont aidé à améliorer la performance et l'efficacité de ces dispositifs dans diverses applications.

Exemples de recherches sur les dissipateurs de chaleur qui ont été menées en 2015 :

-Analyse numérique et expérimentale des performances de refroidissement des dissipateurs de chaleur en cuivre pour des applications électroniques" par M. Djebara et al [35].

-Comparaison des performances thermiques des dissipateurs de chaleur en aluminium et en cuivre pour les applications de refroidissement électronique" par S. K. Gupta et al [36].

-Optimisation des propriétés thermiques des dissipateurs de chaleur en utilisant des nanocomposites de carbone" par H. Li et al [37].

-Étude de l'efficacité du refroidissement par convection naturelle des dissipateurs de chaleur en forme de plaque" par M. B. Yilmaz et al [38]

-Analyse de la performance de refroidissement d'un dissipateur de chaleur hybride en utilisant des ailettes ondulées" par K. Vafai et al [39].

En 2016, il y a eu de nombreux travaux de recherche sur les dissipateurs de chaleur, qui sont des dispositifs conçus pour éliminer la chaleur produite par des composants électroniques tels que les processeurs de PC ou les circuits intégrés.

Voici exemples de travaux achevés sur les dissipateurs de chaleur en 2016 :

-Une étude menée par des chercheurs de l'Université de Californie à Berkeley a exploré l'utilisation de nanotubes de carbone pour améliorer l'efficacité des dissipateurs de chaleur. Les résultats ont montré que les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour améliorer la conductivité thermique des matériaux des dissipateurs de chaleur [40].

-Des chercheurs de l'Université du Michigan ont conçu un nouveau type de dissipateur de chaleur basé sur des micro-ailettes. Les micro-ailettes sont de petites structures en forme de pales qui augmentent la surface de contact entre le dissipateur de chaleur et l'air environnant, améliorant ainsi la dissipation de chaleur [41].

-Une autre étude menée par des chercheurs de l'Université de Californie à San Diego a exploré l'utilisation de liquides diélectriques comme matériau pour les dissipateurs de chaleur. Les résultats ont montré que les liquides diélectriques peuvent être utilisés pour améliorer la dissipation de chaleur par convection, tout en étant plus légers et plus flexibles que les matériaux traditionnels des dissipateurs de chaleur [42].

-Des chercheurs de l'Université de technologie de Delft aux Pays-Bas ont étudié l'utilisation de nano-fils d'or comme matériau pour les dissipateurs de chaleur. Les résultats ont montré que les nano-fils d'or peuvent être utilisés pour améliorer la conductivité thermique des matériaux des dissipateurs de chaleur, tout en étant plus flexibles et plus résistants à la corrosion que les matériaux traditionnels [43].

En 2017, il y a eu plusieurs travaux de recherche et de développement sur les dissipateurs de chaleur, visant à améliorer leur efficacité et leurs performances :

-Utilisation de matériaux avancés : Des études ont été menées sur l'utilisation de matériaux avancés tels que le graphène et le nitrure de bore hexagonal pour la fabrication de dissipateurs de chaleur. Ces matériaux présentent une conductivité thermique exceptionnelle, ce qui permettrait d'augmenter l'efficacité des dissipateurs [44].

-Conception de nouveaux modèles de dissipateurs : Des chercheurs ont développé de nouveaux modèles de dissipateurs de chaleur, tels que des dissipateurs à ailettes circulaires, des dissipateurs à nanotubes et des dissipateurs à micro canaux. Ces nouveaux modèles ont montré des performances améliorées par rapport aux modèles traditionnels [45].

-Optimisation de la forme et de la taille des dissipateurs : Des études ont été menées pour déterminer la forme et la taille optimales des dissipateurs de chaleur en fonction de la source

de chaleur et des conditions d'utilisation. Ces études ont permis de concevoir des dissipateurs plus efficaces et mieux adaptés à leur environnement [46].

-Utilisation de techniques avancées de fabrication : Des techniques avancées de fabrication telles que l'impression 3D ont été utilisées pour fabriquer des dissipateurs de chaleur sur mesure avec des géométries complexes. Cette approche permet une meilleure adaptation du dissipateur aux conditions d'utilisation [47].

Ces travaux ont contribué à améliorer l'efficacité et les performances des dissipateurs de chaleur, ce qui est important pour de nombreuses applications telles que l'électronique, l'aérospatiale, l'industrie automobile, etc.

Il y a eu de nombreux travaux de recherche sur les dissipateurs de chaleur en 2018, couvrant une large gamme d'applications et de technologies :

-Une étude publiée dans la revue *Applied Thermal Engineering* a examiné l'efficacité de différents types de dissipateurs de chaleur pour les ordinateurs portables. Les chercheurs ont conclu que les dissipateurs de chaleur à caloducs étaient les plus efficaces pour refroidir les composants informatiques [48].

-Une autre étude publiée dans la revue *Journal of Heat Transfer* a analysé les performances des dissipateurs de chaleur en utilisant des nano-fluides. Les résultats ont montré que l'utilisation de nano-fluides dans les dissipateurs de chaleur peut améliorer considérablement leur efficacité de refroidissement [49].

-Une équipe de chercheurs de l'Université de Californie à Los Angeles a développé un nouveau type de dissipateur de chaleur à base de graphène. Leur dispositif a montré une meilleure conductivité thermique que les dissipateurs de chaleur traditionnels en cuivre ou en aluminium [50].

-Une étude publiée dans la revue *International Journal of Heat and Mass Transfer* a évalué l'efficacité des dissipateurs de chaleur pour les panneaux solaires. Les chercheurs ont développé un modèle numérique pour évaluer la performance des différents types de dissipateurs de chaleur, en fonction des conditions environnementales [49].

En 2019, de nombreuses recherches ont été menées sur les dissipateurs de chaleur, en particulier dans le domaine de l'électronique et de l'informatique.

Voici quelques exemples de travaux achevés :

-Étude de l'effet de la rugosité de surface sur la performance des dissipateurs de chaleur en aluminium [51].

-Développement d'un dissipateur de chaleur en composite à base de fibre de carbone pour les applications spatiales [52].

-Étude de l'effet de la géométrie des ailettes de refroidissement sur la performance des dissipateurs de chaleur en cuivre [53].

Les travaux de recherche ont été menés sur les dissipateurs de chaleur en 2020, notamment :

-Une étude publiée dans le Journal of Electronic Packaging qui présentait une nouvelle méthode pour la conception de dissipateurs de chaleur à ailettes en utilisant des algorithmes d'optimisation. Cette méthode permettait d'obtenir des dissipateurs de chaleur plus performants que ceux conçus de manière conventionnelle [54].

-Une autre étude publiée dans le Journal of Heat Transfer qui examinait l'efficacité des dissipateurs de chaleur en graphite expansé pour refroidir les composants électroniques. Les résultats ont montré que ces dissipateurs de chaleur étaient plus efficaces que les dissipateurs de chaleur en aluminium ou en cuivre [55].

-Une recherche menée par des scientifiques de l'Université de Californie à Riverside qui a développé un nouveau matériau de dissipateur de chaleur en utilisant des nanotubes de carbone. Ce matériau était plus léger et plus performant que les dissipateurs de chaleur traditionnels [56].

Il y a eu de nombreux travaux de recherche sur les dissipateurs de chaleur dans divers domaines d'application, tels que l'électronique, l'aérospatiale et l'automobile en 2021

Voici quelques exemples de travaux réalisés :

-Étude de l'effet des nanostructures sur les propriétés thermiques des dissipateurs de chaleur en aluminium. Les chercheurs ont découvert que l'ajout de nanoparticules d'oxyde d'aluminium améliore considérablement la conductivité thermique de l'aluminium [57].

-Développement de nouveaux matériaux composites pour les dissipateurs de chaleur. Les chercheurs ont développé des composites à base de polymères renforcés avec des fibres de carbone, qui ont des propriétés thermiques supérieures à celles des dissipateurs de chaleur en aluminium traditionnels [58].

-Modélisation numérique des performances des dissipateurs de chaleur. Les chercheurs ont utilisé des simulations informatiques pour étudier l'effet de différents paramètres de conception sur les performances des dissipateurs de chaleur [59].

-Conception de dissipateurs de chaleur plus efficaces pour les applications de refroidissement par liquide. Les chercheurs ont mis au point des dissipateurs de chaleur avec des canaux plus petits et plus nombreux pour améliorer la dissipation de chaleur dans les systèmes de refroidissement par liquide [60].

-Étude de la thermique des dispositifs électroniques intégrés. Les chercheurs ont étudié l'effet de la taille, de la disposition et de l'agencement des composants électroniques sur les performances thermiques des dissipateurs de chaleur dans les systèmes électroniques intégrés vie [61].

## **I.7.Conclusion**

Un dissipateur de chaleur est essentiel pour maintenir la température des composants électroniques à un niveau sûr et stable. Il permet de transférer la chaleur générée par ces composants vers l'air ambiant ou un liquide de refroidissement. Le choix du dissipateur de chaleur adapté dépendra de nombreux facteurs tels que la puissance dissipée, la surface disponible, l'environnement d'utilisation et les contraintes de fabrication. 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.

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 est important dans de nombreux domaines tels que : la mécanique des fluides, l'énergie solaire, les systèmes d'isolation, et la conception des échangeurs de chaleur.

L'objet de ce chapitre est de présenter les équations qui gouvernent le phénomène de la convection en régime laminaire : la conservation de masse (la continuité), la quantité de mouvement (Navier-Stokes), de l'énergie pour le fluide et la paroi, ainsi que les conditions aux limites pour chaque grandeur.

## II.2 Introduction sur la Convection

Ce mode de transfert est basé sur le fait qu'il y a déplacement de matière : il ne concerne donc que les fluides (liquides et gaz). Contrairement à la conduction où le transfert de chaleur se fait par contact, dans le fluide, la possibilité de déformation sous l'effet de la température permet de mettre en œuvre des mouvements de ce fluide plus ou moins importants. Ces mouvements sont dus à des différences de pression et/ou des différences de température. Dans le premier cas, si l'écoulement est dû à des forces extérieures (pompe, ventilateur...). On est alors dans des conditions de convection forcée. C'est ce mode qui est généré lorsque l'on veut améliorer c'est à dire augmenter l'échange thermique. Dans le second cas, l'écoulement se fait naturellement, il est dû à la différence de densité des différentes zones du fluide. Ce phénomène est très courant et s'appelle convection naturelle [62].

### 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,

$$Q = h S(T_p - T_f) \quad (\text{II.1})$$

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  $h$  [63].

### II.3 Régime d'écoulement

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : « laminaire » et « turbulent ».

- Un écoulement est dit laminaire lorsque le mouvement des particules fluides se fait de façon régulière et ordonnée.
- L'écoulement est turbulent lorsque le déplacement est irrégulier et que des fluctuations aléatoires de vitesse se superposent au mouvement moyen du fluide.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer, si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds « Re » [63].

- $Re < 2000$  le régime est laminaire
- $2000 < Re < 3000$  le régime est intermédiaire
- $Re > 3000$  le régime est turbulent

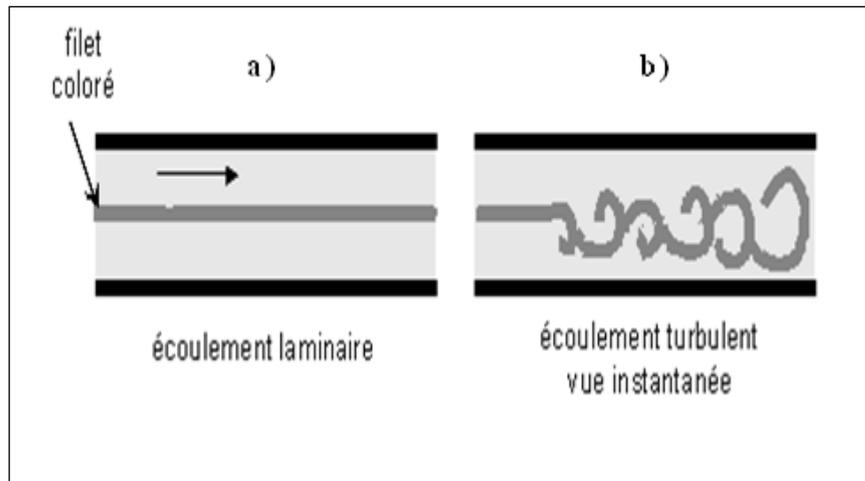


Figure II.1 : Exemple d'écoulements laminaires et turbulents

#### II.4. Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur

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 quel rapport des unités équivaut à 1.

Les nombres adimensionnels dépendent des paramètres suivants :

- \*  $D_h$  : Diamètre hydraulique [m]
- \*  $V_0$  : Vitesse caractéristique [m/s]
- \*  $\rho$  : Masse volumique du fluide [ $\text{kg/m}^3$ ]
- \*  $\lambda$  : Conductivité thermique du fluide [W/m.k]
- \*  $\nu$  : Viscosité cinématique du fluide [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].
- \*  $\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s].
- \*  $h$  : Coefficient de transfert convectif [ $\text{W/m}^2.\text{K}$ ]

## 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

Elle est déduite du principe de conservation de masse et s'exprime sous forme tensorielle comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (\text{II.2})$$

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

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

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II.3})$$

### II.5.2. Les équations de quantité de mouvement

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, le taux temporaire de changement de quantité de mouvement d'une particule fluide est égal à la somme des forces extérieures sur cette particule. L'équation de la dynamique sous forme tensorielle s'écrit alors comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

Où :

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

$\frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j}$ : Représente le taux net de transport de quantité de mouvement suivant la

direction i, par mouvement du fluide.

$F_i$  : Représente les forces de volume suivant la direction i.

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

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$ : 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

Elle est obtenue par l'application du premier principe de la thermodynamique. Cette équation pour un fluide Newtonien incompressible, s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + q + \mu \Phi \quad (\text{II .5})$$

Où

$K$  : La conductivité thermique.

$C_p$  : La chaleur spécifique à pression constante.

$\rho$ : La masse volumique.

$q$  : La génération de chaleur par unité de volume (densité de chaleur volumétrique).

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide.

$\Phi$ : La dissipation visqueuse.

### II.6. Hypothèses simplificatrices

Pour une formulation simple du modèle mathématique, nous allons considérer les hypothèses suivantes :

1. L'écoulement du fluide et le transfert de chaleur sont permanents.
2. Le régime est laminaire
3. Le nano-fluide utilisé est un fluide newtonien, incompressible
4. Les propriétés thermo-physiques du nano-fluide ( $k$ ,  $\mu$ ,  $\beta$  et  $C_p$ ) sont considérées constantes et prises à la température de référence à l'exception, de la masse volumique dans le terme de la poussée d'Archimède qui est supposée obéir à l'approximation de Boussinesq.
5. Milieu continu.

6. Ecoulement tridimensionnel (suivant les coordonnées x, y et z).
7. La dissipation visqueuse est négligeable

## II.7. Equations dimensionnelles

Après introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans cette étude comme suit :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.6})$$

- **Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant x**

$$\rho \left[ \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right\} \quad (\text{II.7})$$

- **Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant y**

$$\rho \left[ \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right] \right\} \quad (\text{II.8})$$

- **Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant z**

$$\rho \left[ \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right\} + g\beta(T - T_0) \quad (\text{II.9})$$

- **Equation de l'énergie**

- Pour l'eau

$$\rho C_p \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (\text{II.10})$$

- Dans les ailettes solides

$$K_S \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = 0 \quad (\text{II.11})$$

-L'équation de l'Isolation thermique

$$-n \cdot q = 0 \quad (\text{II.12})$$

**-Le flux thermique**

$$\Phi = h S (T_p - T_f) \quad (\text{II.13})$$

**II.8. Calcul des grandeurs Hydrodynamique et Thermique****II.8.1. Le diamètre hydraulique**

Le diamètre hydraulique est défini comme le rapport entre le volume du fluide qui entoure les ailettes et la surface totale mouillée :

$$D_h = \frac{4 \cdot V_f}{A_f} \quad (\text{II.14})$$

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.

**II.8.2. Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement de fluide

$$Re = \frac{\rho u_0 D_h}{\mu} \quad (\text{II.15})$$

$\rho$ : la masse volumique du fluide.

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

$D_h$ : le diamètre hydraulique.

$\mu$  : la viscosité dynamique du fluide.

**II.8.3. Coefficient d'échange convectif h**

L'expression du coefficient d'échange moyen est :

$$\bar{h} = \frac{q_c}{A(\bar{T}_w - \bar{T}_m)} \quad (\text{II.16})$$

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

$$q_c = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\bar{T}_{out} - T_0) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

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

$$\bar{T}_{out} = \frac{\iint_A T \cdot u \cdot dA}{\iint_A u \cdot dA} \quad (\text{II.18})$$

$T_0$  : Température d'entrée.

$C_p$  : capacité (calorifique) massique à pression constante

$\dot{m}$  : débit massique, en kg/s

A: surface d'échange thermique.

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

$$\bar{T}_w = \frac{1}{A} \iint T \cdot dA \quad (\text{II.19})$$

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

$$\bar{T}_m = \frac{\iiint_V T \cdot u \cdot dV}{\iiint_V u \cdot dV} \quad (\text{II.20})$$

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

#### II.8.4. Le nombre de Nusselt

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

L'expression du nombre de Nusselt moyen qui nous avons utilisé dans cette étude est :

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D_h}{K_f} \quad (\text{II.21})$$

$K_f$ : la conductivité thermique de l'air

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

#### II.8.5. La Résistance thermique

L'indice important du taux de transfert de chaleur est la résistance thermique  $R_{th}$ , qui est considérée comme une caractéristique des performances thermiques des ailettes :

$$R_{th} = \frac{\bar{T}_b - T_0}{q_c} \quad (\text{II.22})$$

Où

$\bar{T}_b$  est la température moyenne de la base du dissipateur de chaleur.

$$\bar{T}_b = \frac{1}{A} \iint T \cdot dA \quad (\text{II.23})$$

## **II.9. Conclusion**

Ce chapitre, nous a permis de vous présenter le modèle physique considéré et les équations qui régissent le phénomène de la convection forcée en régime laminaire.

Dans le prochain chapitre nous allons exposer le logiciel de simulation comsol multiphysics 6.0 et par la suite nous vous révélerons notre travail de simulation.

# Chapitre III

Résultats et Discussions

### **III.1. Introduction**

La simulation se définit comme l'analyse ou l'utilisation de modèles pour un système spécifique pour comprendre son comportement dans un contexte spécifique et améliorer ses performances. C'est l'un des outils d'aide à la décision les plus efficaces dont disposent les concepteurs et les gestionnaires de systèmes complexes.

Dans ce chapitre, nous procédons à la simulation du phénomène de transfert de chaleur d'un dissipateur. En utilisant le logiciel Comsol Multiphysics pour dessiner la géométrie et simuler le comportement selon des conditions aux limites et nous avons présenté les résultats de simulations numériques l'analyse de différents paramètres notamment : le profil de vitesse, température et pression.

### **III.2. Présentation de logiciel de simulation**

#### **III.2.1 Présentation du COMSOL**

Pour concevoir le modèle thermique, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics. C'est un programme conçu par la société "Comsol". Fondé en 1986 en Suède par Svante Littmarck et Farhad Saeidi. Spécialisé dans le développement de logiciels, il est utilisé par bon nombre des plus grandes entreprises du monde. En utilisant COMSOL, vous tout système basé sur la physique peut être modélisé et simulé. COMSOL Multiphysics comprend l'interface COMSOL Desktop® utilisateur graphique et un ensemble d'interfaces d'utilisateur prédéfinis avec des outils de modélisation associés, appelés interfaces de physique, pour la modélisation des applications courantes. Une suite de produits add-on élargit cette plate-forme de simulation multiphysique pour la modélisation des domaines d'application spécifiques ainsi que l'interface avec des logiciels tiers et de leurs capacités. COMSOL Multiphysics est nécessaire pour exécuter l'un des produits add-on.

La notion de multi-physique est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. On peut décrire mathématiquement des phénomènes physiques très différents par les mêmes équations générales. Alors que des géométries et des phénomènes complexes nécessitent la modélisation avec des équations complexes et des conditions aux limites, COMSOL Multiphysics offre un couplage des différentes formulations physiques simple. Le résultat de ses systèmes sont des équations qui peuvent être résolues de façon séquentielle ou dans une formulation entièrement couplée.

Multiphasiques étendus : Physique dans différentes géométries peuvent être facilement combinés. Ces variables de couplage peuvent également être utilisés pour lier des physiques ou des géométries différentes comme dans notre cas. Lors de la modélisation et les simulations, ces descriptions sont basées sur les lois de la physique.

### **III.2.2. Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics**

L'objectif principal de la création de COMSOL Multiphysics était de permettre au logiciel de Les scientifiques et les ingénieurs peuvent utiliser l'interface utilisateur pour formuler n'importe Quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) basé sur des lois physiques et Surtout basé sur les domaines les plus courants de la physique et de l'ingénierie. Ce L'interface est basé sur un interpréteur d'équations qui formule la discrétisation élément par élément Fait "à la volée" par le système entièrement couplé. Interface de modélisation Prédéfini pour différents domaines de la physique appliquée, y compris les couplages Multiphysique. Grâce à la technologie sous-jacente, les attributs, les sources, les puits et Les conditions aux limites peuvent être des fonctions de variables modélisées et de leurs dérivées partie de. L'équation complète est également disponible dans l'interface utilisateur une manipulation.

### **III.2.3. Plan de décisions et de construction**

Choix de la dimension : 3D, 2D, 2D axisymétrique...

Choix des modules physique : Transfert de chaleur, Transport d'espèces, Ecoulement laminaire...

Choix du type d'étude : Stationnaire, Temporelle, Fréquentielle...

Construction de la géométrie

Choix du (ou des) matériau(x)

Paramétrage du (ou des) module(s) physique(s)

Paramétrage et calcul du maillage

Paramétrage et calcul de l'étude

Représentation graphique des résultats

### **III.2.4. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 6.0**

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. À gauche, on retrouve le constructeur de modèle où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème, le constructeur de modèle où se retrouvent la géométrie, les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème

étudié et les paramètres de maillage. Le constructeur de modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur étude et les options d'affichage et de post traitement des données résultat

La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Géométrie. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de **COMSOL 6.0** sont présentés à la figure III.1.

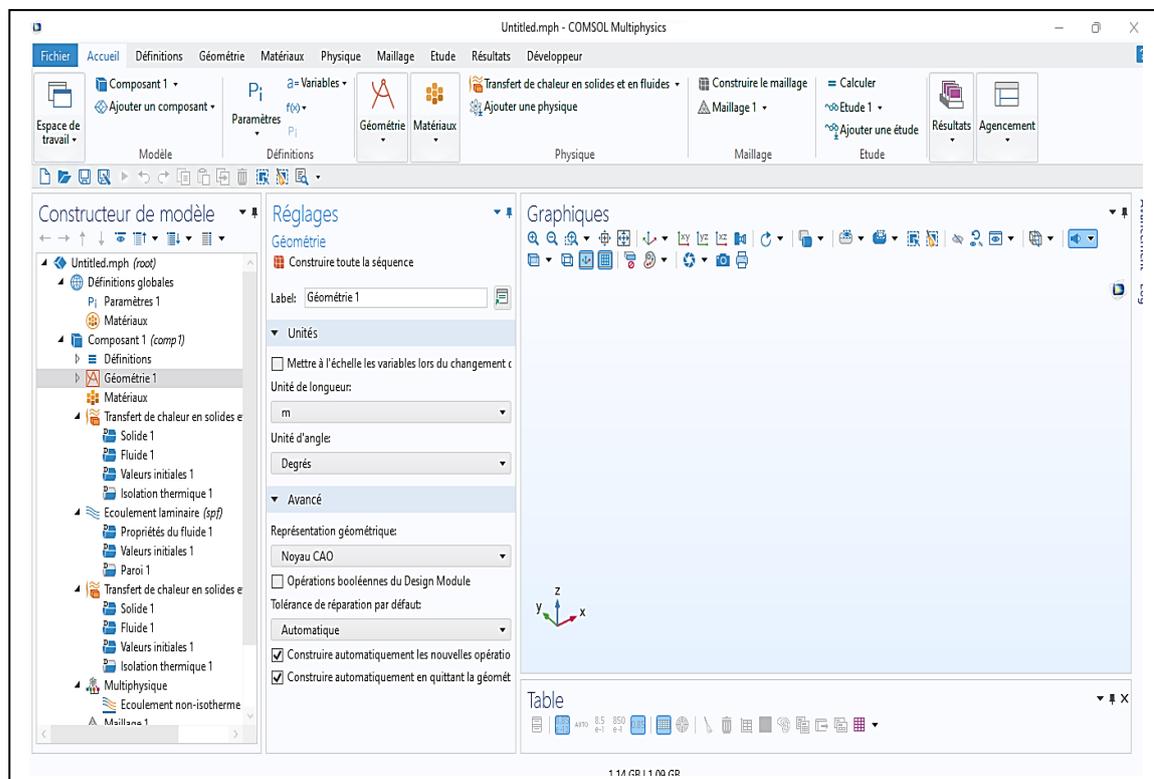


Fig. III.1: Interface utilisateur de COMSOL 6.0

### III.2.5. Création du modèle de simulation

Ouvrez une nouvelle simulation **COMSOL**, choisissez le modèle en **3D**, cliquez sur. Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. **Sélectionnez** le modèle **Ecoulement laminaire (spf)** dans la catégorie **transfert de chaleur en solide et en fluide**. Une fois la sélection du modèle effectué, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous **Sélectionner l'étude**, choisissez le cas d'étude en régime permanent (**Stationnaire**), puis cliquez sur (**terminer**) figure III.2. Sauvegardez la simulation dans votre répertoire personnel.

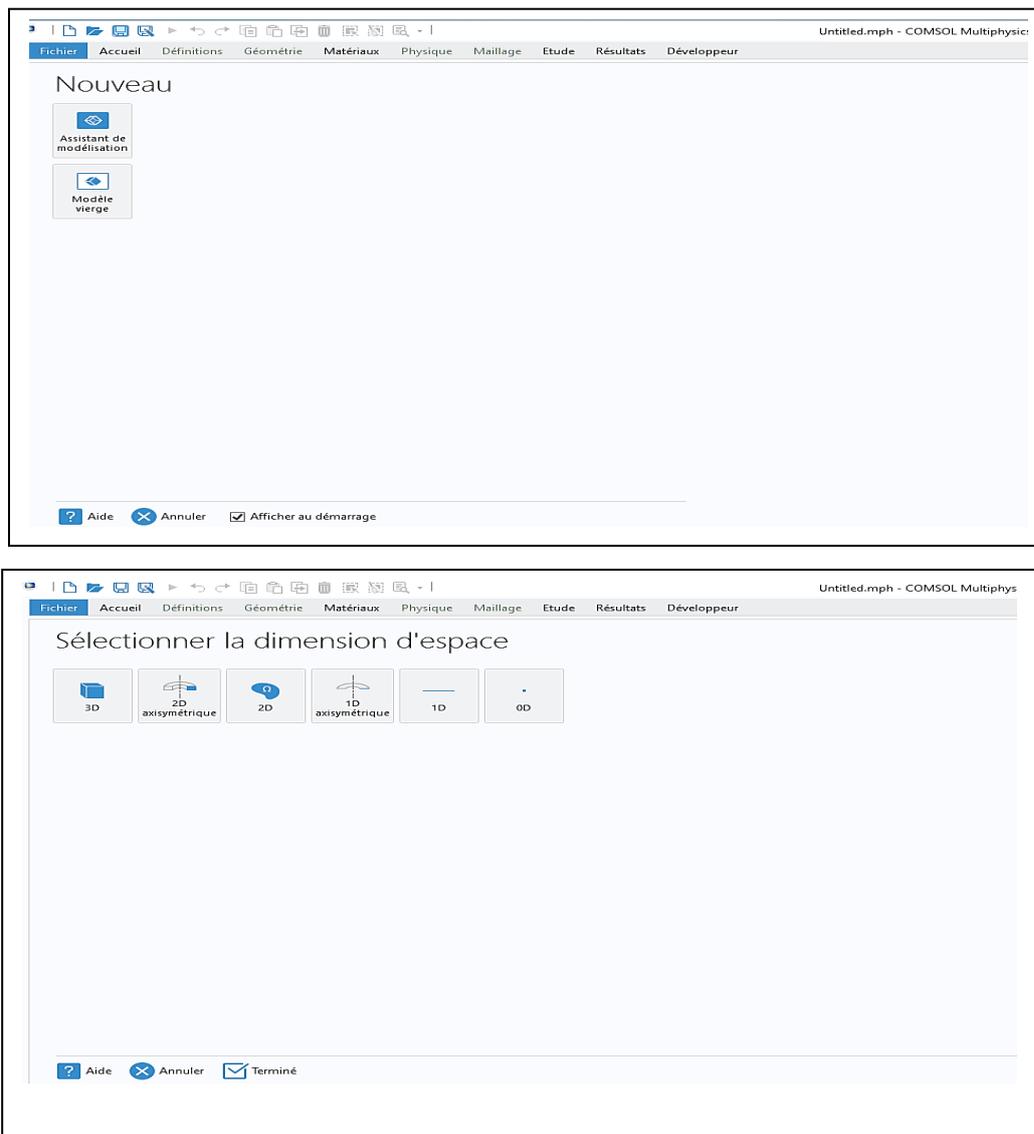


Fig. III.2 : Création du modèle dans Comsol 6.0

### III.2.6. Maillage

Cliquez sur **Maillage** et choisissez comme taille de maillage **Normale** figure III.3, laissez le maillage défini en tant que **Physics-controlled mesh**. Cliquez sur **construire** toute la séquence, il est maintenant possible de voir le maillage triangulaire (option par défaut). Il est possible de définir manuellement les paramètres de maillage.

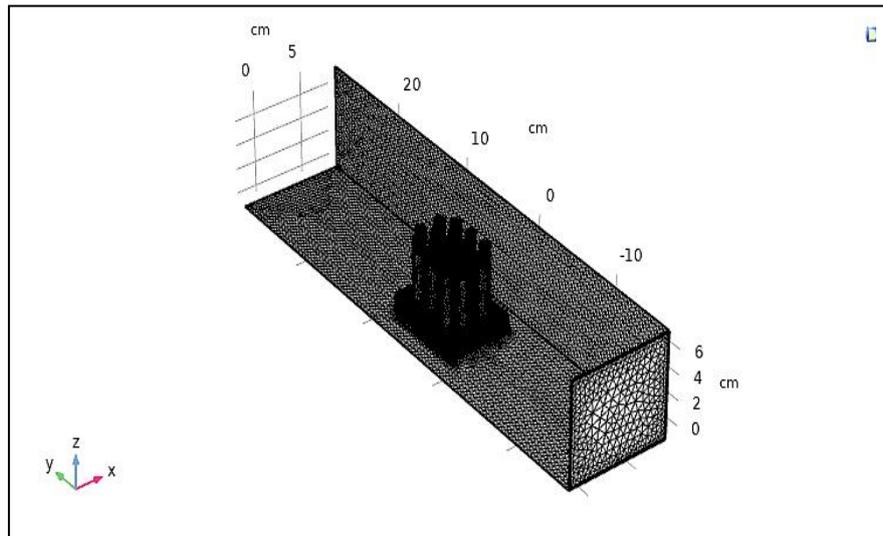


Fig. III. 3 : État du modèle avant de simuler

### III.2.7. Simulation et traitement des résultats

Pour effectuer la simulation, cliquez sur **étude** dans le **constructeur de modèle** puis sur **Calculer**. COMSOL se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis figure III.4. Si vous désirez changer les paramètres du solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'onglet **étude**, mais cela n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tutoriel.

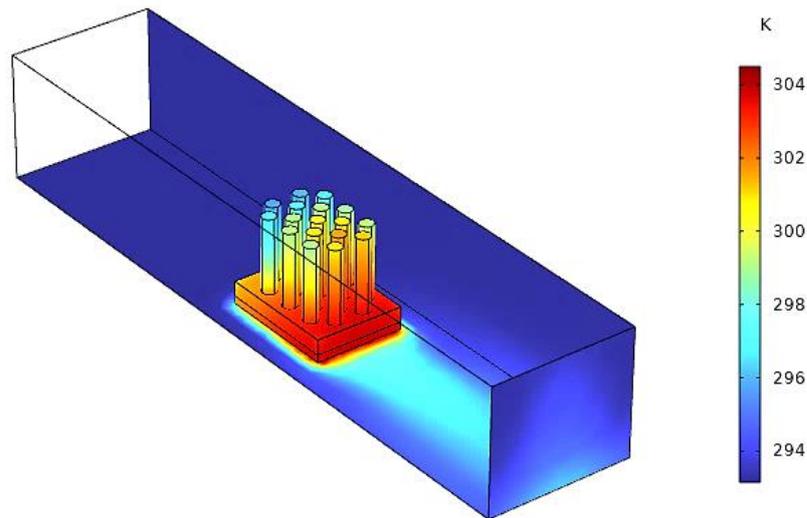


Fig. III.4: Résultat de la simulation

### III.3. Géométries de Problème Considéré

- **Dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines**

La géométrie du problème étudié figure III.5 est montrée un canal parallélépipédique contenant un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques fixé à sa paroi inférieure. Les ailettes cylindriques ont un diamètre  $d=1\text{cm}$  et sont disposées en arrangement décalé sur une hauteur  $H_a=5\text{cm}$ . Le dissipateur de chaleur est fabriqué en Aluminium de conductivité thermique égale à  $202,4\text{W/m.K}$ .

Le dissipateur de chaleur est fixé à une base parallélépipédique de dimensions  $8\text{cm} \times 6\text{cm}$  et une épaisseur  $e_b = 1\text{cm}$ . Cette base sert de support aux ailettes et permet la fixation du dissipateur dans le canal.

Le dissipateur de chaleur est en contact avec un composant électronique en Silicium d'épaisseur  $e_s=0,5\text{cm}$  et de conductivité thermique égale à  $130\text{W/m.K}$ . Le composant électronique génère une quantité de chaleur  $Q=40\text{W}$ , qui doit être dissipée par le dissipateur.

L'ensemble (dissipateur + composant électronique) est monté dans un canal parallélépipédique de dimensions  $10 \times 46 \times 8,5\text{cm}$ . Le canal est horizontal et contient le dissipateur de chaleur fixé à sa paroi inférieure. Le fluide circule dans le canal et permet la dissipation de la chaleur générée par le composant électronique à travers les ailettes du dissipateur.

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier Stokes et l'équation d'énergie, qui expriment la conservation de masse, de quantité de

Mouvement et d'énergie. Pour une formulation simple du problème, nous allons considérer quelques approximations entre autres les approximations de Boussinesq.

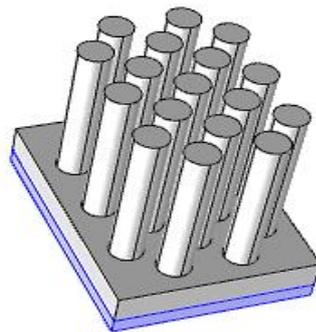
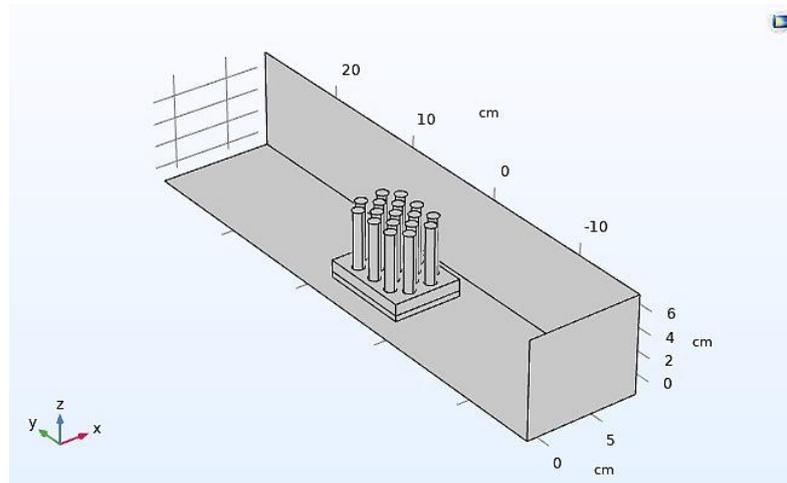


Fig. III.5: Vue isométrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes pleines.

### III.4. Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante.

Il existe quatre types de conditions aux limites dans notre étude :

- Entré : toutes les propriétés du fluide sont connues.
- Sortie : le régime est établi.
- Paroi : pour les parois les vitesses sont nulles
- L'interface : le flux à l'interface fluide solide est couplé

Les conditions aux limites pour l'ensemble d'équations régissant sont présentées ci-dessous :

➤ L'entrée du canal  $y=0$  (velocity inlet) :

$$u = u_0, \quad T_0 = 293.16\text{K}.$$

➤ La sortie du canal :  $y=46\text{cm}$  (pressure outlet) :

$$P = P_{atm}$$

➤ Base dissipateur (Wall) : adiabatique

$$u = v = w = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

➤ Les parois du canal (Wall) : adiabatiques

$$u = v = w = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

➤ Interface fluide paroi est couplé :

$$K_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{wall}} = K_f \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{wall}}$$

➤ Pour le composant électronique, il génère une quantité de chaleur :  $Q = 40 \text{ W}$ .

### III.5. Paramètres utilisés

❖ Les propriétés physiques de fluide de base utilisée l'eau :

- Masse volumique :  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ .
- La capacité calorifique :  $C_p = 4182 \text{ J/kg.K}$ .
- Conductivité thermique  $\lambda = 0.6 \text{ W/kg.K}$ .
- Viscosité dynamique  $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$ .

❖ Le dissipateur de la chaleur est fabriqué en Aluminium qui a les propriétés physiques suivantes :

- Masse volumique :  $\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$
- La chaleur spécifique  $C_p = 871 \text{ J/kg.K}$
- Conductivité thermique  $\lambda = 202.4 \text{ W/m.K}$

❖ Le composant électronique est en silicium qui a les propriétés physiques suivantes :

- Masse volumique :  $\rho = 2329 \text{ kg/m}^3$
- La chaleur spécifique  $C_p = 700 \text{ J/kg.K}$
- Conductivité thermique  $\lambda = 130 \text{ W/kg.K}$ .

❖ Les propriétés physiques du nano-fluide (eau + Cuivre) avec fraction volumique :

$\phi$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kg.K)	$\mu$ (kg/m.s)	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)
9%	1712.332	2399.242	0.00127	0.000020613	0.777145

Tableau III.1 : propriétés physiques du (eau + cuivre) avec 9%

❖ Les propriétés physiques du nano-fluide (eau+TiO<sub>2</sub>) avec fraction volumique :

$\phi$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kg.K)	$\mu$ (kg/m.s)	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)
9%	1290.862	3146.14683	0.00126969	1.92378E-05	0.74393976

Tableau III.2 : propriétés physiques du (eau + TiO<sub>2</sub>) avec 9%

### III.6. Effet de Maillage

La première chose à faire pour réaliser la simulation numérique est Définition de maillages adaptés à l'écoulement. Sa qualité dépend résultat. Dans cette étude, différentes grilles non uniformes sont considérées comme examiner l'indépendance du réseau pour garantir l'exactitude et la fiabilité du réseau avant de procéder à la solution numérique, nous avons choisi d'utiliser un maillage extrêmement grossier figure III.6.

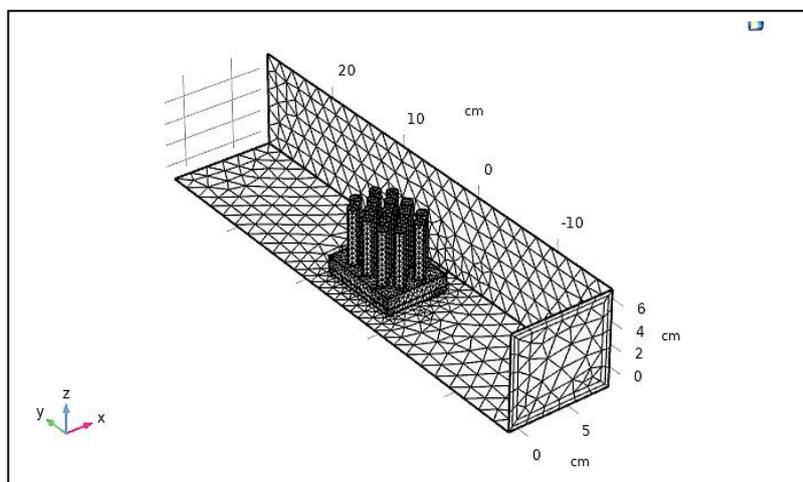


Fig. III.6: Maillage

Points du maillage	13512	Nombre d'élément	54120
Type d'éléments	Toutes les éléments	Qualité minimale des éléments	0.02214
Tétraèdre	41996	Qualité moyenne des éléments	0.5922
Pyramides	786	Ratio volumique de l'éléments	8.415E-5
Prismes	11338	Volume du Maillage	3910 cm <sup>3</sup>
Triangles	7078		
Quads	88		
Eléments d'arêtes	1356		
Eléments ponctuels	156		

Tableau III.3 : Statistique et résultat de maillage extrêmement grossier

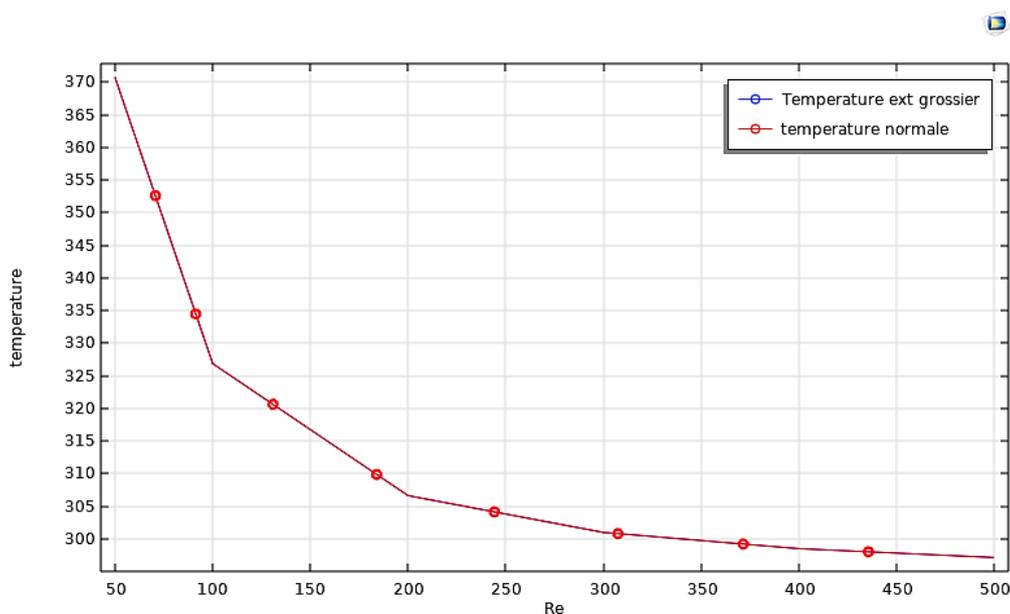


Fig. III.7 : Comparaison de température en maillage extrêmement grossier et maillage normale

### III.6.1. Test de convergence

Les simulations numériques ont été réalisées en utilisant un maillage contrôlé par l'utilisateur afin d'étudier une géométrie spécifique. Différents maillages ont été testés en variant le nombre d'éléments de calcul. Les résultats ont montré une stabilité et une convergence du modèle pour ces différents maillages. Le type de maillage utilisé est appelé "user-controlled mesh" (maillage contrôlé par l'utilisateur). Ce choix signifie que vous avez eu un contrôle direct sur la génération du maillage. Les éléments utilisés dans ce maillage sont

des éléments triangulaires libres prédéfinis par "Normal". Cela suggère que vous avez utilisé des triangles avec des angles internes relativement proches de 60 degrés, ce qui est généralement favorable pour assurer la stabilité numérique.

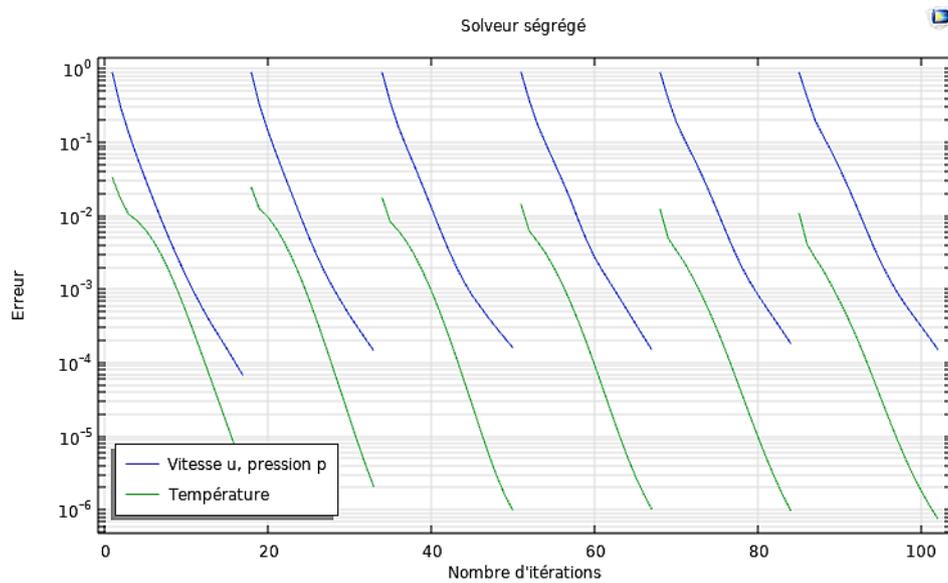


Fig.III.8 : Test de convergence

## III.7. Résultats et discussions

### III.7.1. Pour l'eau

#### III.7.1.1. Etude du profil de température

La figure III.9 montre la distribution de champs de température dans la source froide à ailettes cylindriques pleines, nombres de Reynolds  $Re= 100, 300$  et  $500$ .

Notez que la température des ailettes diminue lorsque le nombre d'ailettes augmente Reynolds. Une augmentation du nombre de Reynolds conduit à Vitesse d'entrée pour un meilleur transfert de chaleur par convection et par conséquent, plus de chaleur est évacuée des ailettes.

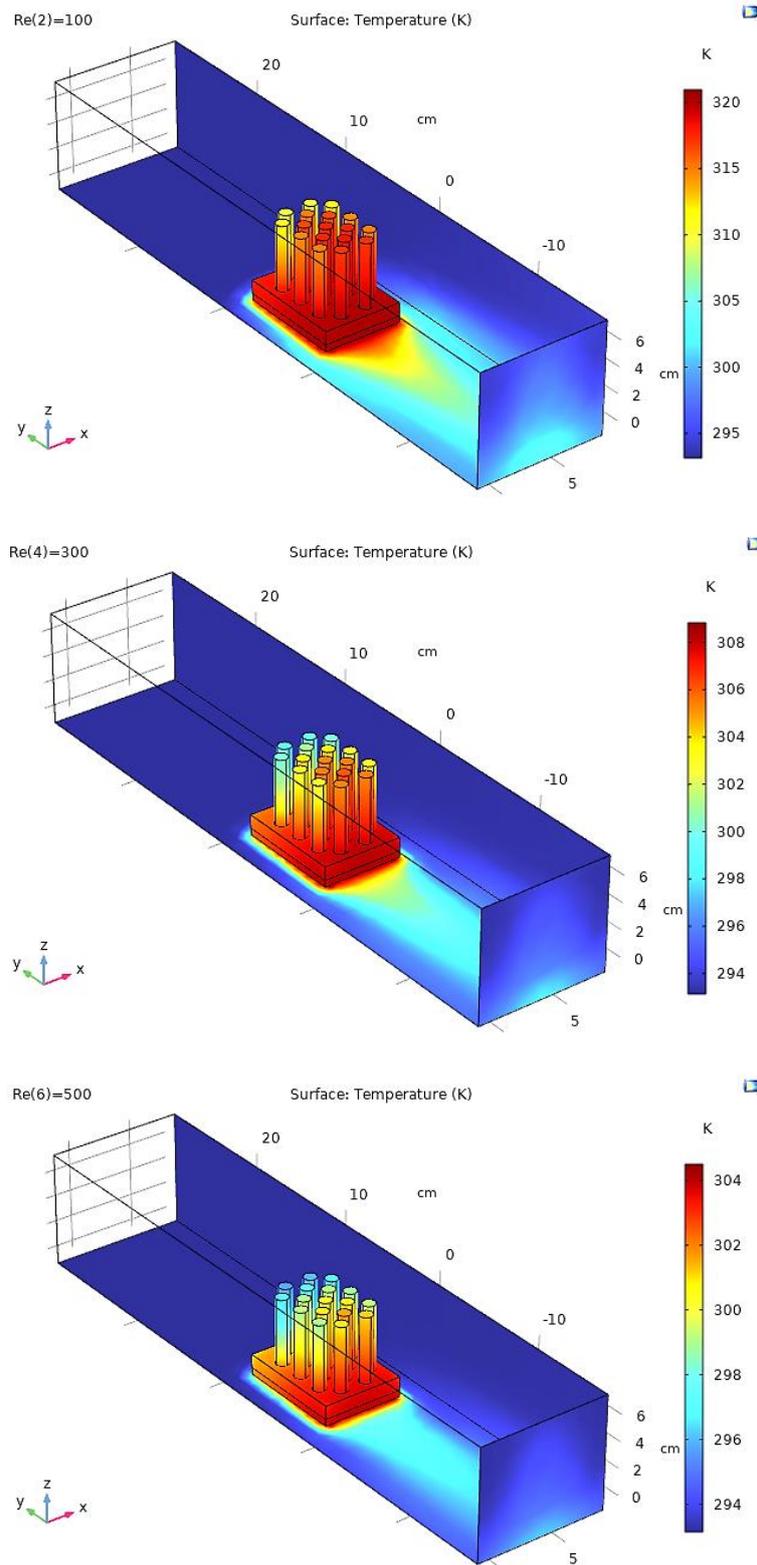
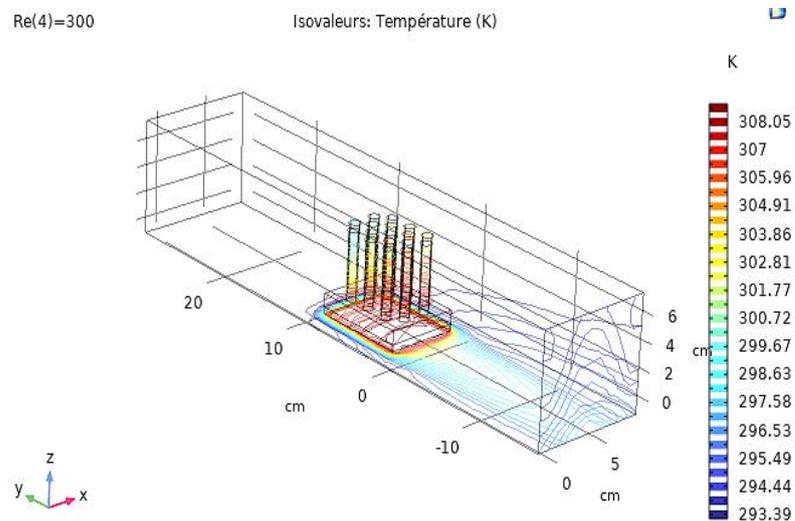
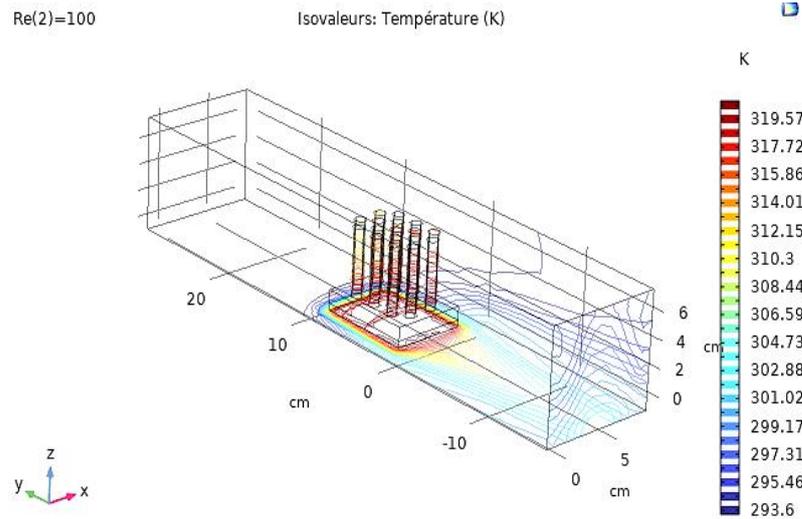


Fig. III.9 : Distribution de champ de température sur le long de dissipateur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds

La figure III.10 Présente les contours de température dans un dissipateur de chaleur équipé d'ailettes cylindriques pleines pour différents nombres de Reynolds :  $Re=100$ , 300 et 500. Il est observé que la température des ailettes diminue à mesure que le nombre de Reynolds augmente. Cette diminution est due à l'augmentation de la vitesse d'écoulement, résultant de l'augmentation du nombre de Reynolds. En conséquence, le transfert de chaleur par convection est amélioré, ce qui permet une évacuation plus efficace de la chaleur à partir des ailettes.



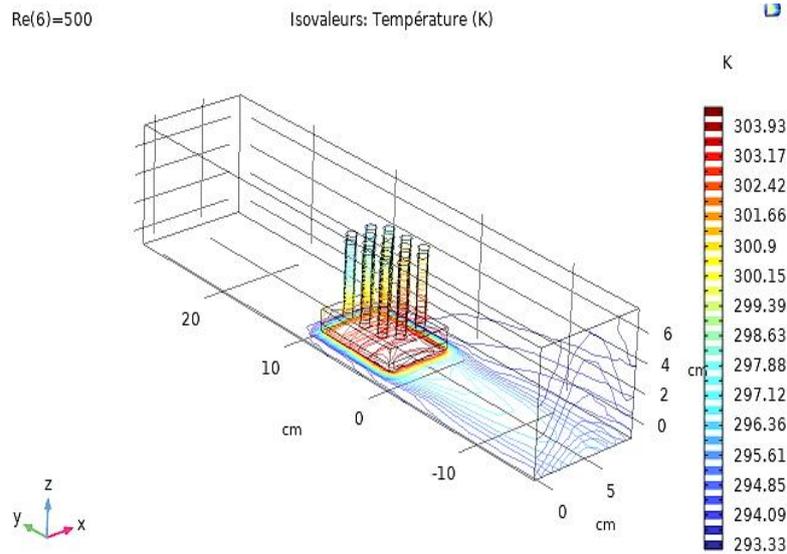


Fig. III.10 : Les contours de la température dans un dissipateur de chaleur pour différent nbr de Reynold.

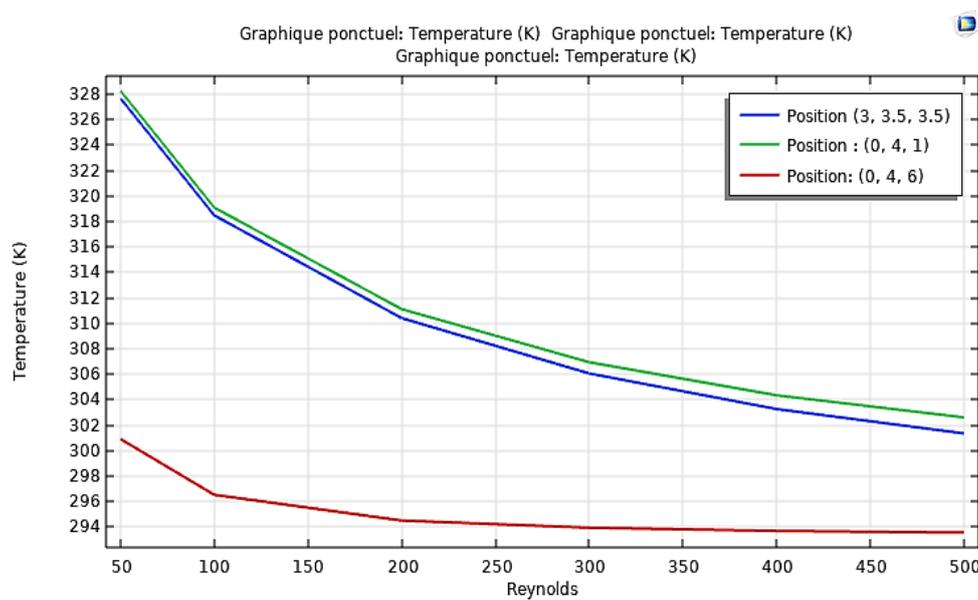


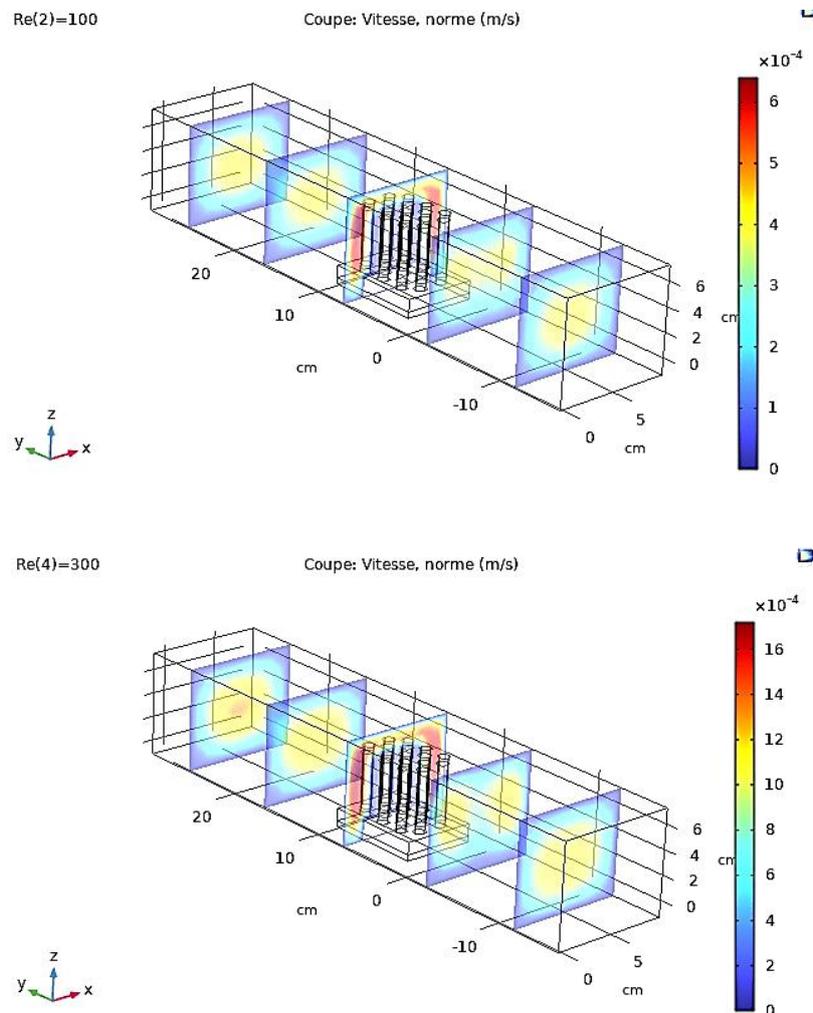
Fig. III.11 : Variation de température en fonction de nombre de Reynolds dans dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques dans différentes positions

La figure III.11 montre le changement de température à différents positons :

- ✓ Position (0 ,4 ,1) : en bas sur la surface
- ✓ Position (0 ,4 ,6) : en haut des pines
- ✓ Position (3 ,3.5 ,3.5) : au milieu des pines

### III.7.1.2. Champs de vitesse, lignes de courant et contours

La figure III.12 présente les champs de vitesse dans le plan  $Z=37\text{cm}$  pour différentes valeurs du nombre de Reynolds ( $Re=100, 300, 500$ ), fournissant ainsi des détails importants sur la structure de l'écoulement. On observe que les champs de vitesse présentent un profil uniforme à l'entrée du canal, mais deviennent nuls le long de toutes les parois des ailettes en raison de la condition de non glissement qui y est appliquée. Lorsque les particules fluides s'approchent des parois des ailettes, les vecteurs de vitesse changent de direction, créant ainsi un mélange favorable au transfert de chaleur. De plus, on peut remarquer une accélération de la vitesse dans l'espace entre les ailettes dans la direction longitudinale, ce phénomène étant attribué à la réduction de la section de passage du fluide.



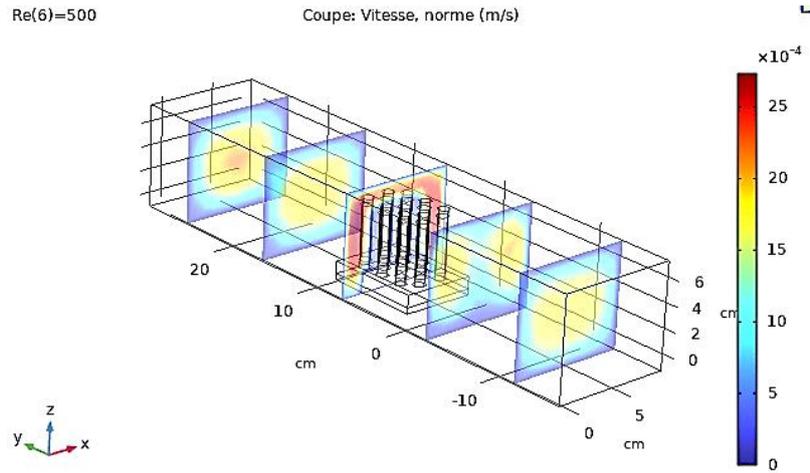
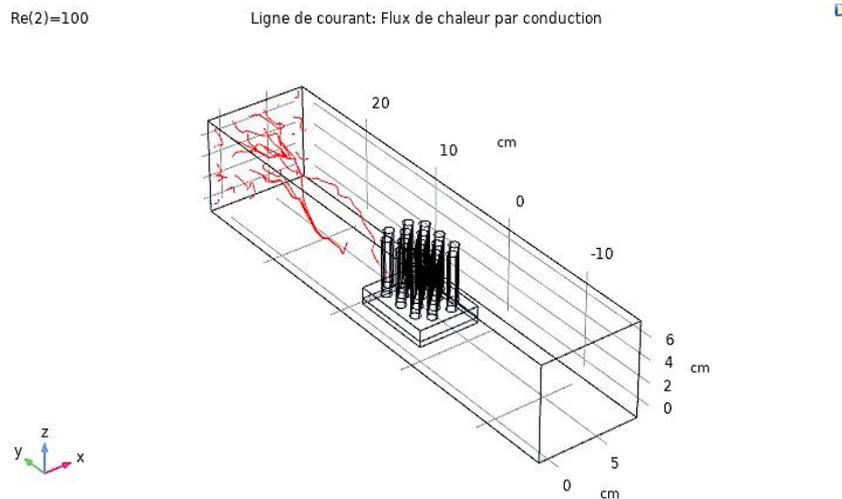


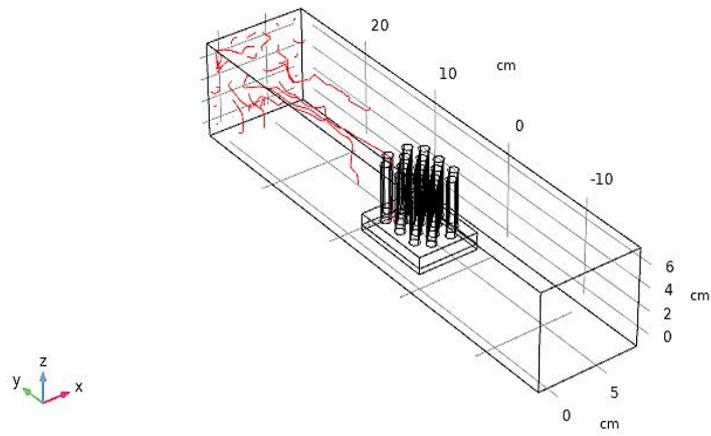
Fig. III.12: Champs de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.

La figure. III.13 présente les lignes de courant pour les valeurs du nombre de Reynolds ( $Re=100, 300, 500$ ). Dans tous les cas, l'écoulement est qualifié de rampant, ce qui signifie que les forces de viscosité prédominent. En raison des faibles vitesses d'écoulement, le fluide reste attaché aux ailettes et il n'y a pas de décollement. On observe une quasi-symétrie de l'écoulement pour chaque colonne d'ailettes par rapport à son axe central, ainsi qu'entre l'amont et l'aval de l'ailette.



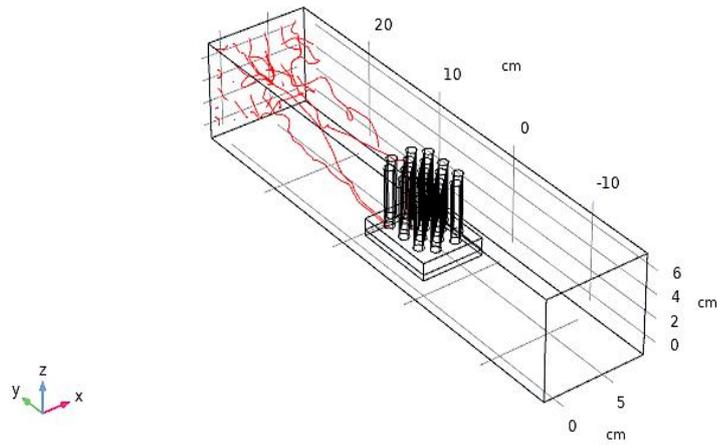
Re(4)=300

Ligne de courant: Flux de chaleur par conduction



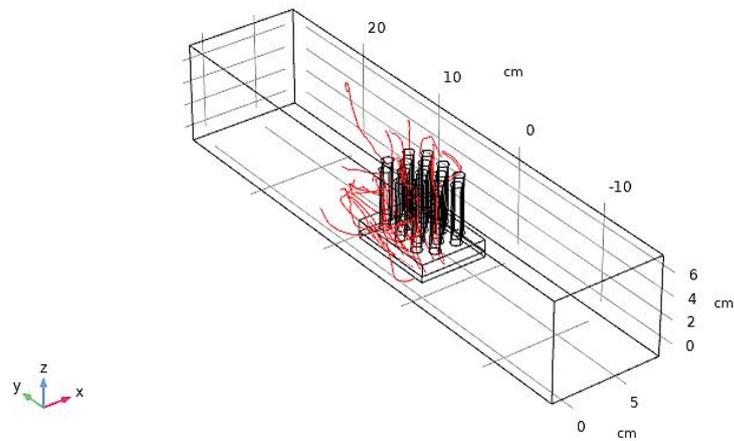
Re(6)=500

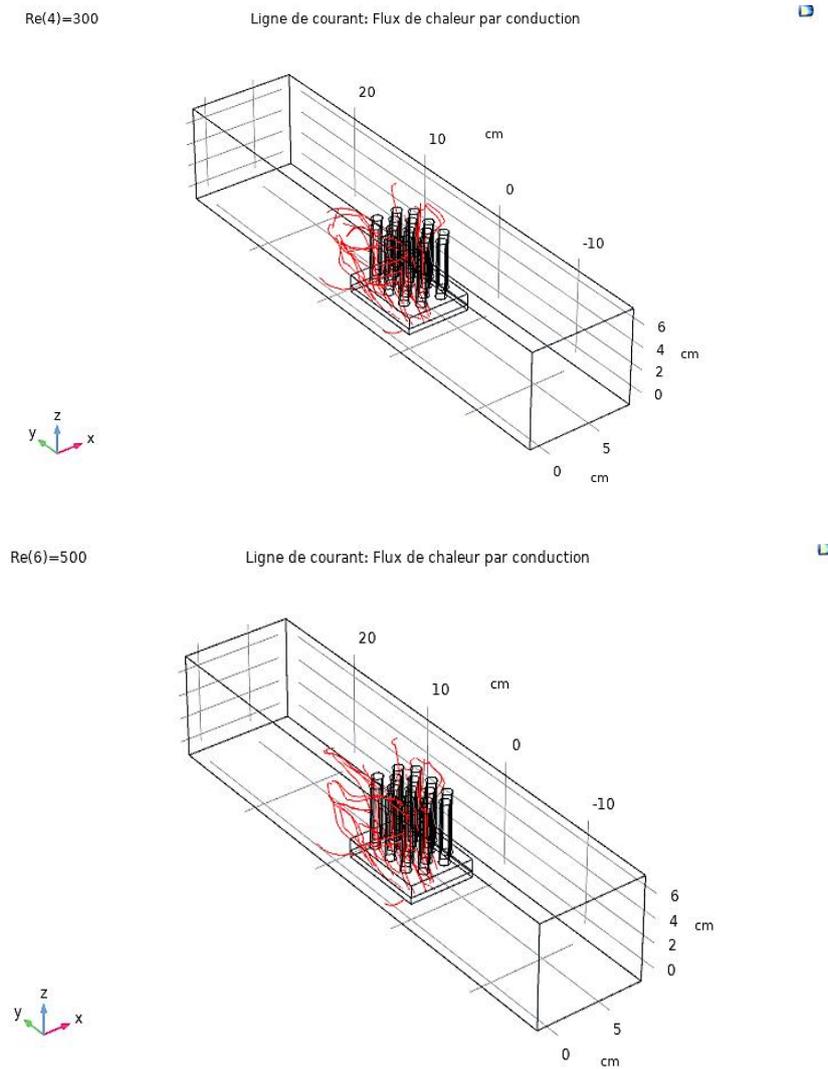
Ligne de courant: Flux de chaleur par conduction



Re(2)=100

Ligne de courant: Flux de chaleur par conduction





*Fig. III.13: Les lignes de courant dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds*

La figure III.14 présente les contours de vitesse dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines et pour des nombres de Reynolds  $Re=100, 300$  et  $500$ .

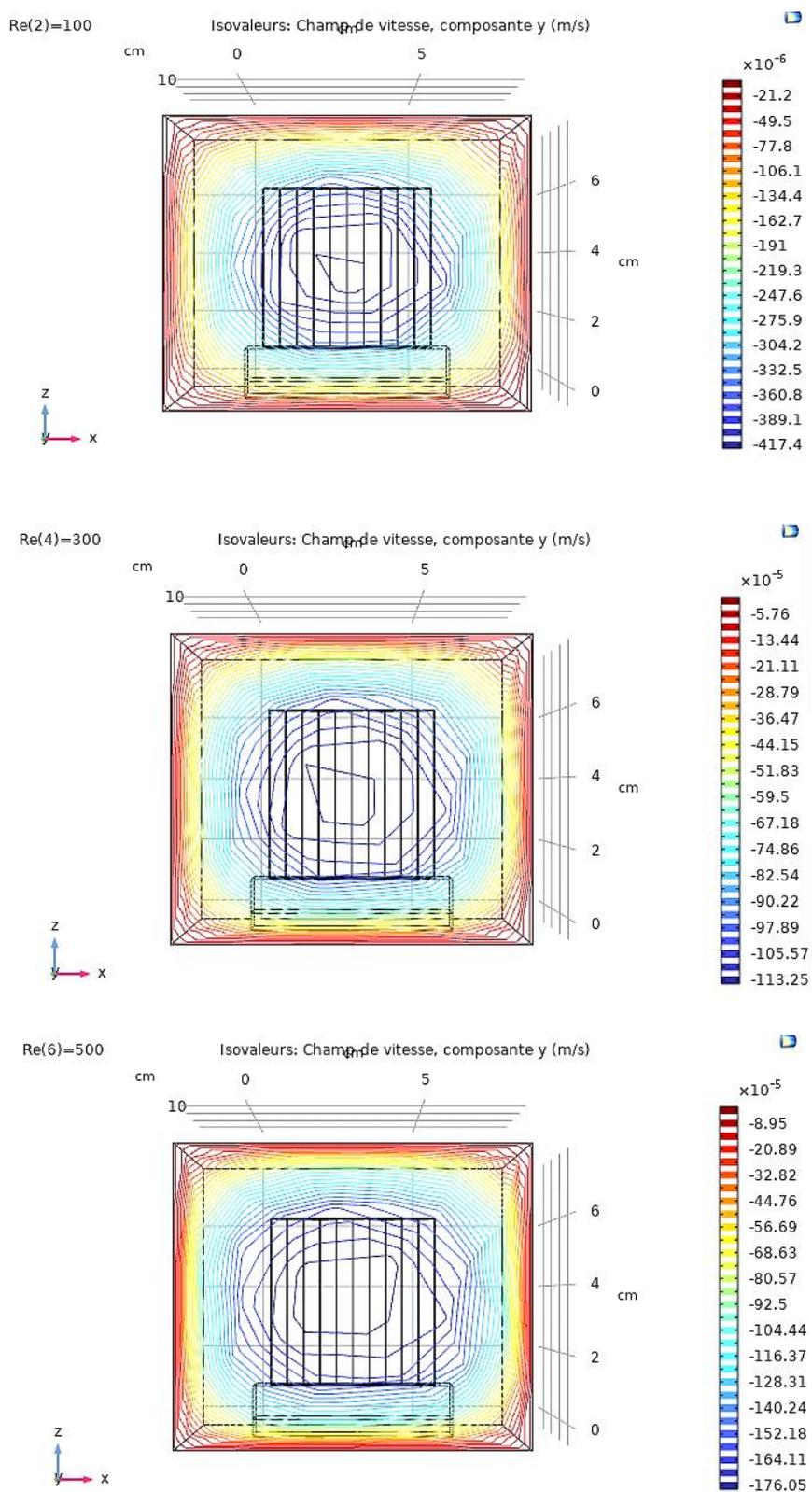


Fig. III.14: Vue isométrique des contours de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.

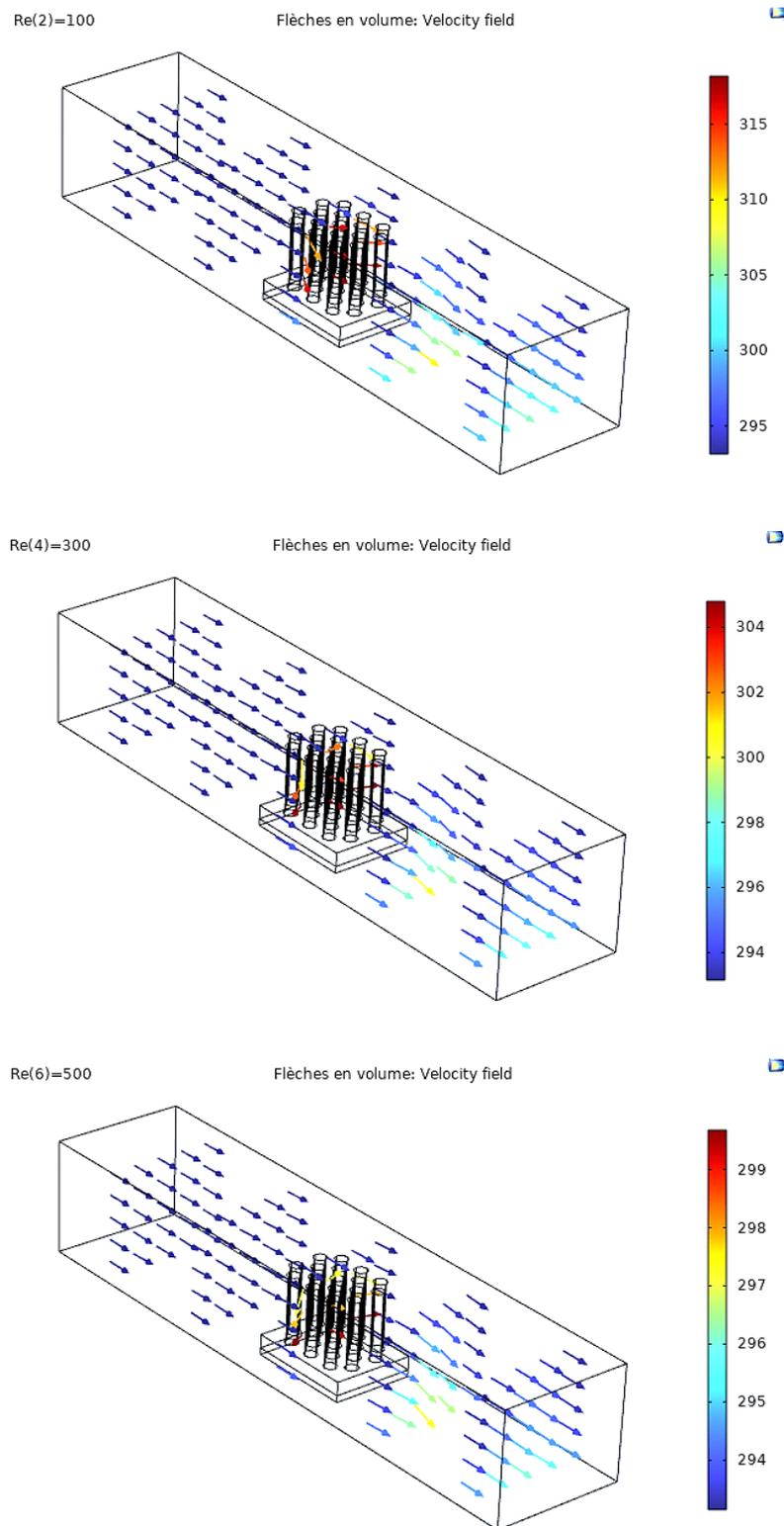


Fig. III.15: Vue isométrique des flèches en volume de vitesse « velocity field » dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.

### III.7.1.3. Contours de pression

La figure III.16 présente les contours de pression dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines et pour des nombres de Reynolds  $Re=50, 100, 300$  et  $500$ .

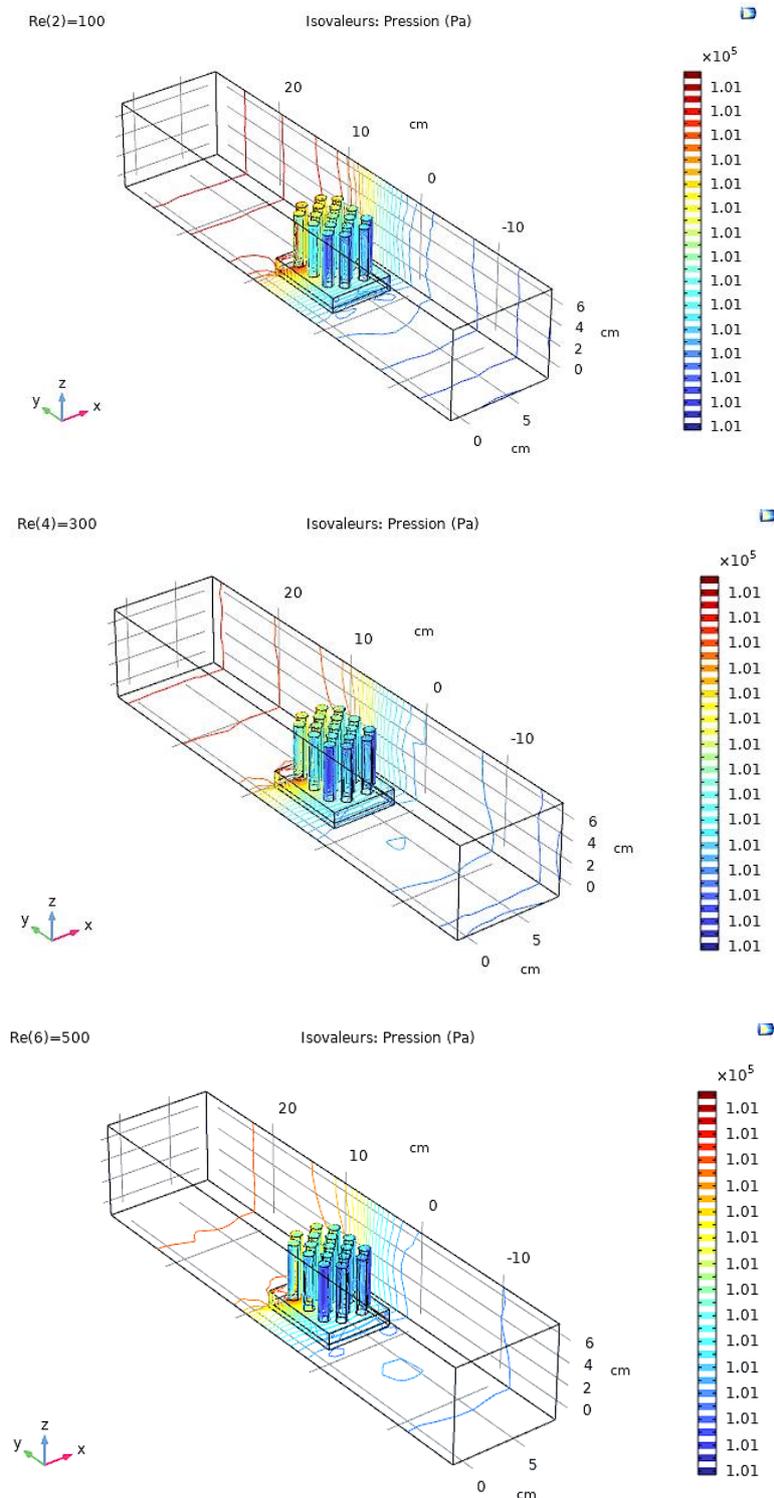


Fig. III.16: Vue isométrique des contours de pression dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds.

### III.7.1.4. Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds

Le nombre de Nusselt est défini comme le rapport du flux de chaleur convectif au flux de chaleur conductif. Les résultats de ce calcul ont été obtenus à partir de l'équation (II.17) et sont présentés graphiquement dans la figure III.17.

La figure illustre la variation du nombre de Nusselt pour l'eau à l'intérieur d'un dissipateur thermique à ailettes pleines en fonction du nombre de Reynolds. On peut observer que le nombre de Nusselt augmente à mesure que le nombre de Reynolds augmente. Cette augmentation du nombre de Nusselt est due à l'augmentation du nombre de Reynolds, qui correspond à une augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide. Cette augmentation de la vitesse favorise le transfert de chaleur par convection entre le fluide et les parois des ailettes, ce qui entraîne une meilleure dissipation de la chaleur. Par conséquent, cela permet de refroidir efficacement l'ensemble du système.

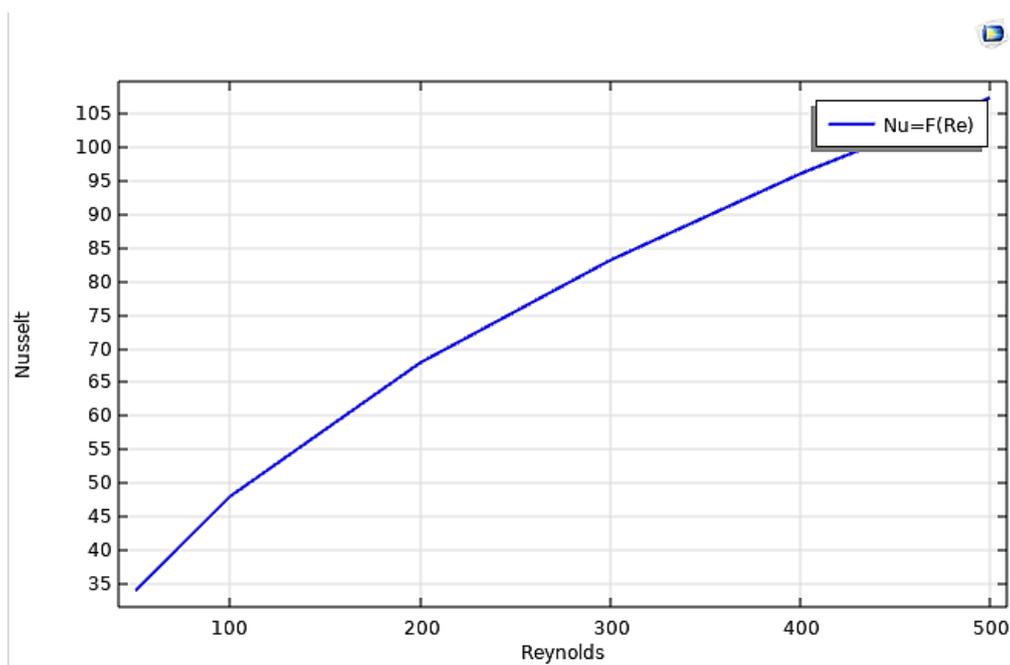


Fig. III.17: Variation du nombre de Nusselt dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines en fonction du nombre de Reynolds

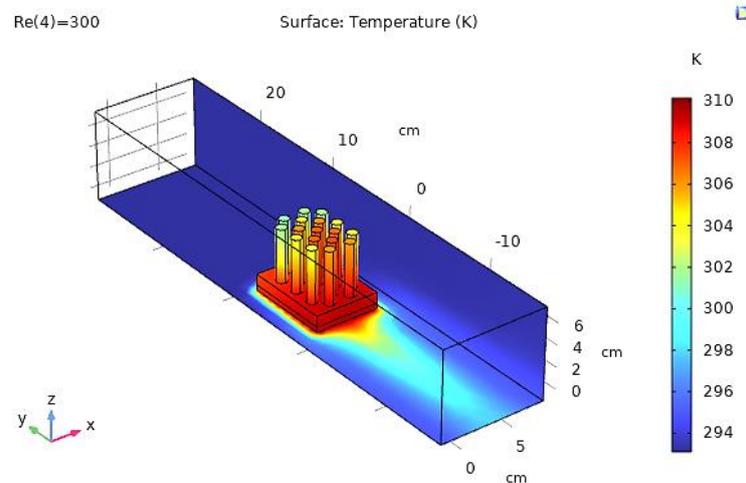
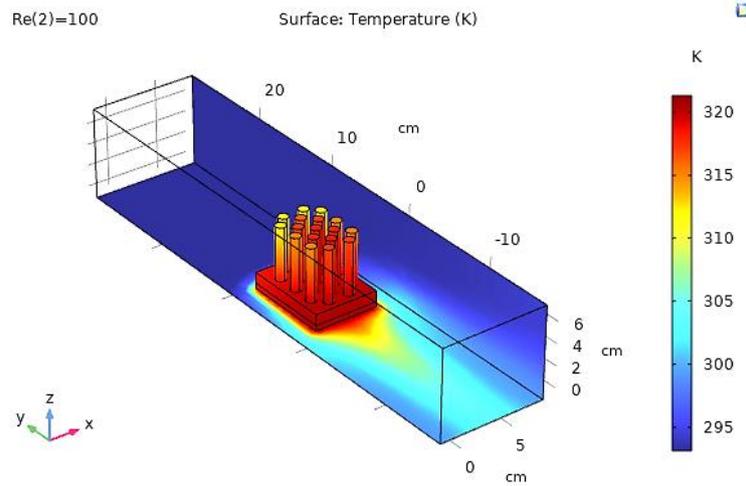
### III.7.2. Pour les nano-fluides

#### III.7.2.1. Etude du profil de température

Les figures III.18 et III.19 présentent le profil de températures pour les nano-fluides (eau + dioxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ )) et (eau + cuivre) pour la concentration volumique citée en haut,

dans le dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour différent nombre de Reynolds  $Re=100, 300$  et  $500$ .

On observe que plus le nombre de Reynolds augmente, plus la température diminue. La température des ailettes est également inférieure à celle de l'eau pure, démontrant que l'ajout de nanoparticules à l'eau améliore significativement le transfert convectif et par conséquent, la capacité de refroidissement du système.



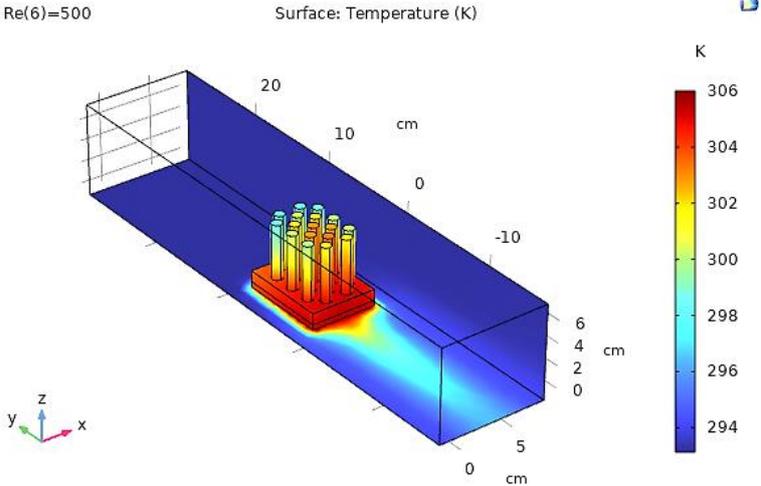
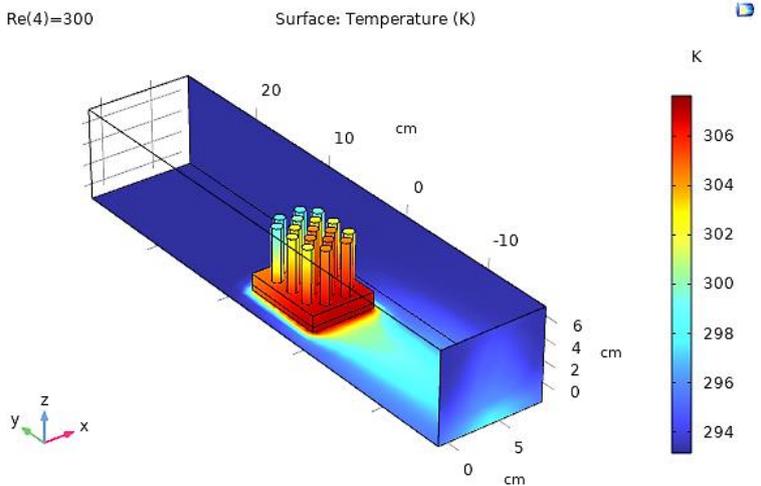
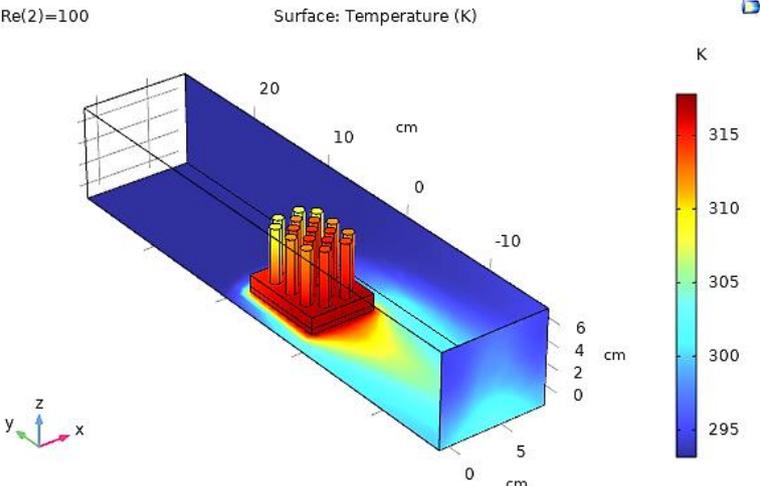


Fig. III.18 : Vue isométrique de profil de température pour nano fluide (eau+ TiO2) à différent nombre de Reynolds



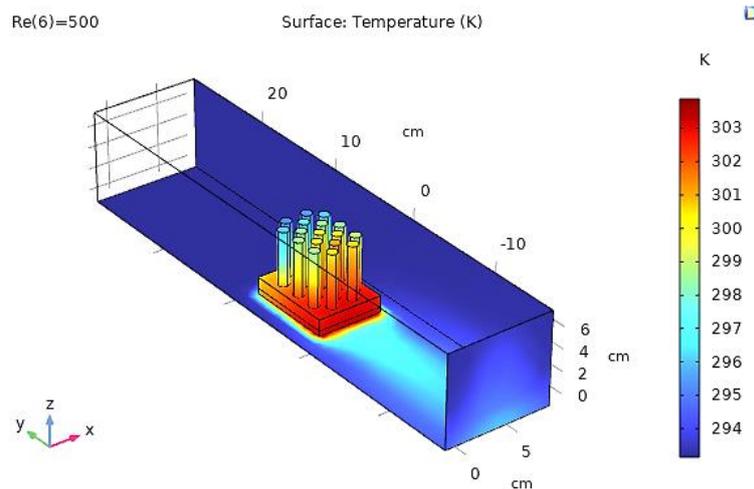


Fig. III.19: Vue isométrique de profil de température pour nano fluide (eau+ cuivre) à différent nombre de Reynolds

### III.7.2.2. Comparaison de l'eau et les nano-fluides

- Les nano-fluides, en raison de leur conductivité thermique supérieure à celle de l'eau pure, ont la capacité de transférer la chaleur de manière plus efficace. Cela signifie qu'ils peuvent dissiper la chaleur générée par une source chaude plus rapidement et efficacement.
- Les nano-fluides à base de particules de cuivre ont une conductivité thermique encore plus élevée que les nano-fluides à base d'oxyde de titane, ce qui les rend plus efficaces pour le transfert de chaleur.
- Les nano-fluides ont généralement un coefficient de transfert de chaleur plus élevé que l'eau pure. Cela signifie qu'ils peuvent transférer la chaleur plus rapidement sur une surface donnée.

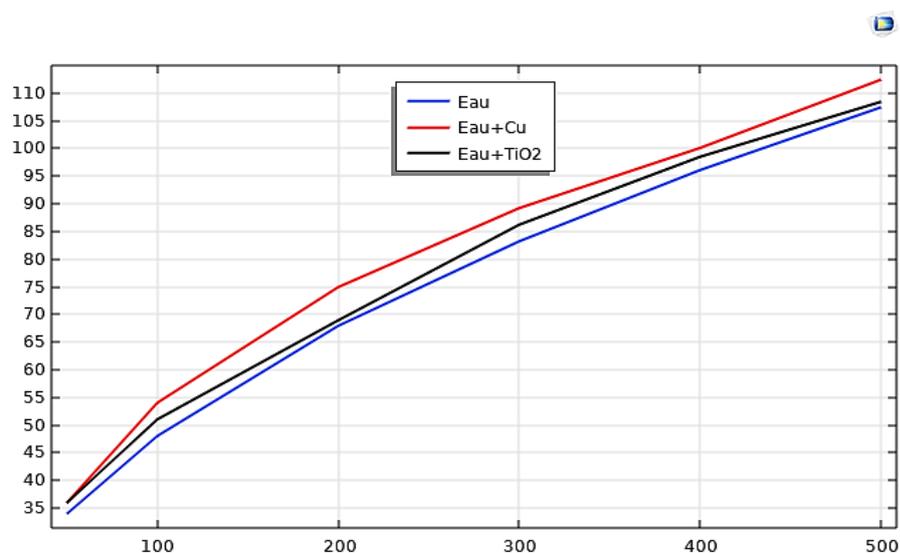


Fig. III.20: Comparaison de la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds de l'eau et les deux nano-fluides : eau + Cu et eau +TiO<sub>2</sub>.

On peut voir figure III.20 que l'eau seule enregistre les valeurs les plus basses, suivie de l'eau avec du cuivre et du dioxyde de titane. Par conséquent, on peut conclure que le nano-fluide eau + Cu assure un meilleur échange convectif et, par conséquent, un meilleur refroidissement du système.

### III.8. Etude de cas

#### III.8.1. Dissipateur de chaleur à ailettes à plaques

La géométrie étudiée dans ce cas est schématisée par la figure III.21 elle consiste d'un dissipateur de chaleur en aluminium de 7 ailettes à plaques on a utilisé les mêmes propriétés physiques que l'initiale tel que les conditions limites

Bloc	Aluminium	Silicium	Canal	Ailette
Largeur (cm)	4	4	8	4
Profondeur(cm)	6.2	6.2	36	0.2
Hauteur (cm)	0.3	0.3	7.5	4

Tableau III.4 : Les dimensions de la géométrie étudiée

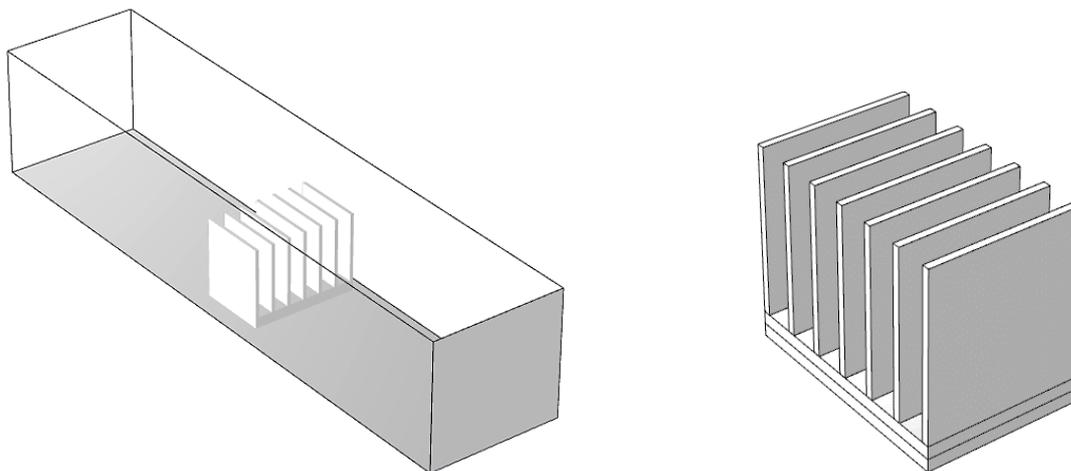
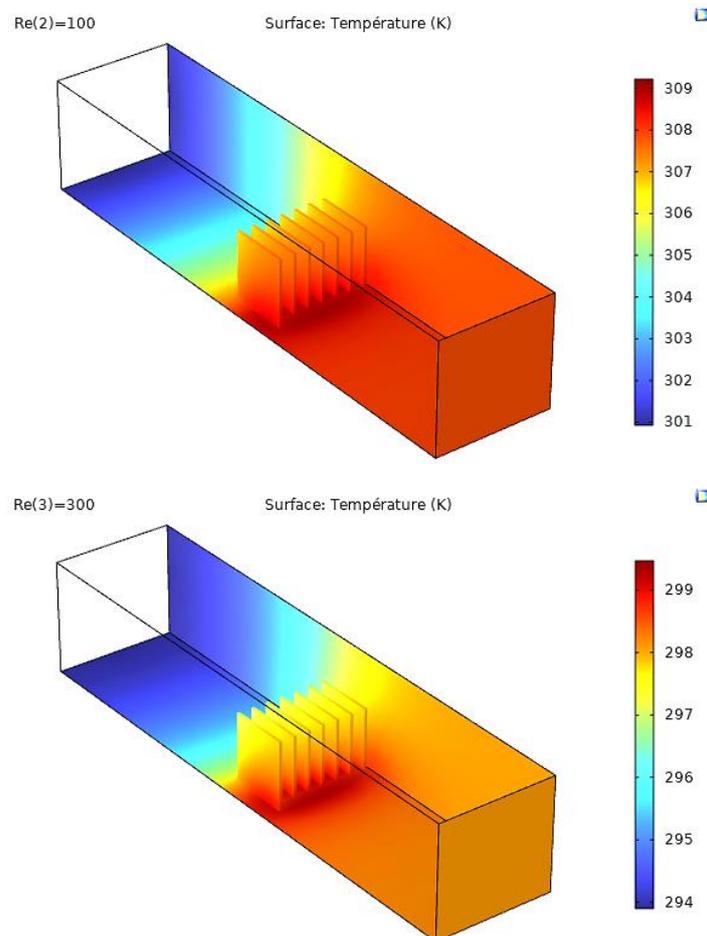


Fig. III.21 : Vue isométrique d'un dissipateur de chaleur à ailettes plaques.

### III.8.2. Etude du profil de température

La figure III.22 présente le profil de températures pour l'eau dans le dissipateur de chaleur à ailettes plaques pour différent nombre de Reynolds  $Re=100, 300$  et  $500$

On remarque que la température diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. On remarque aussi une diminution de température des ailettes par rapport à les ailettes à plaques, ce qui montre que le remplacement des ailettes améliore le refroidissement du système



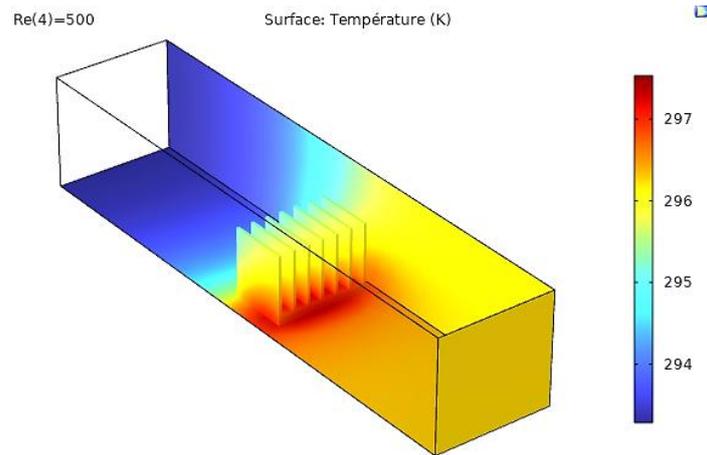
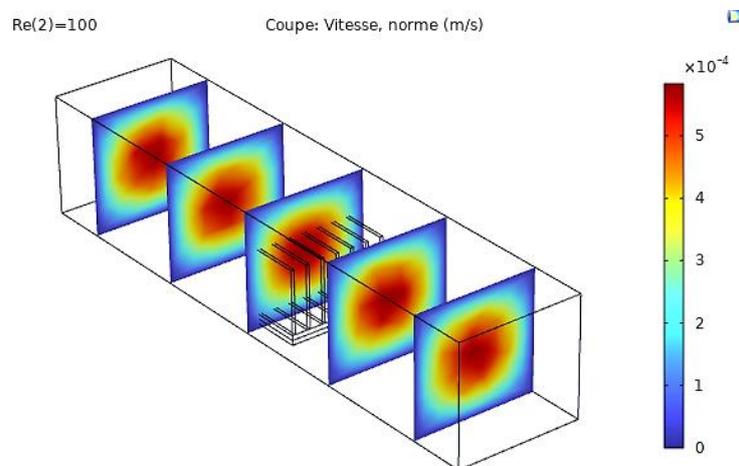


Fig.III.22. Distribution de champ de température sur le long de dissipateur à ailettes à plaques pour différents nombres de Reynolds

La figure III.23 montre le champ de vitesse pour différents nombres de Reynolds n constate que le profil de la vitesse autour des ailettes a la même tendance pour les différentes valeurs Re=100, 300 et 500



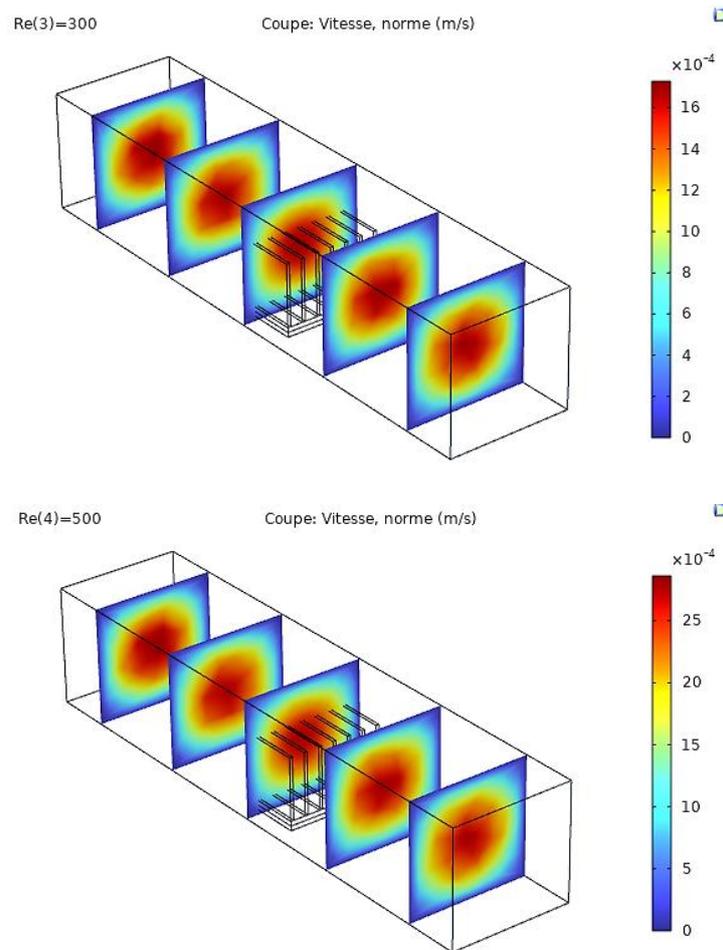


Fig.III.23. Champs de vitesse dans le dissipateur de chaleur à ailettes à plaques pour différent nombre de Reynolds

### III.8.3. Comparaison entre les ailettes cylindriques et plaques

Dans un dissipateur de chaleur, les ailettes jouent un rôle crucial en augmentant la surface de dissipation thermique, ce qui permet de transférer la chaleur plus efficacement vers l'environnement. Les ailettes cylindriques et plaques sont deux types d'ailettes couramment utilisées dans les dissipateurs de chaleur.

Les ailettes plates sont plaques et rectangulaires, tandis que les ailettes cylindriques sont en forme de cylindre. Voici quelques différences clés entre les deux :

1. Surface de dissipation thermique : Les ailettes plaques offrent une plus grande surface de dissipation thermique par unité de volume par rapport aux ailettes cylindriques. Cela est dû à leur forme plate, qui permet une meilleure exposition à l'air environnant. Les ailettes

cylindriques ont une surface de dissipation thermique relativement plus petite, car seule la surface externe du cylindre est utilisée pour la dissipation thermique.

2. Efficacité de dissipation thermique : En raison de leur plus grande surface de dissipation thermique, les ailettes plaques ont généralement une meilleure efficacité de dissipation thermique que les ailettes cylindriques. Elles permettent un transfert de chaleur plus rapide et plus efficace grâce à une plus grande zone de contact avec l'air.

En conclusion, les ailettes plaques offrent généralement une meilleure performance de dissipation thermique en raison de leur plus grande surface de contact avec l'air et de leur moindre résistance à l'écoulement. Cependant, le choix entre les ailettes cylindriques et plaques dépendra des exigences spécifiques de votre application, telles que l'espace disponible, les contraintes de conception et les performances thermiques requises.

### **III.9. Conclusion**

Après avoir étudié le comportement thermique de dissipateur de chaleur en particulier : la distribution de la température, et la vitesse d'écoulement, nous avons découvert que : premièrement, le dissipateur que nous avons utilisé avait un bon rôle dans le dégagement de chaleur, la géométrie des ailettes cylindriques pleines et la hauteur appropriée ont également aidé le transfert de chaleur optimal, ainsi que l'espace et le positionnement parallèle des ailettes, ce qui a rendu un bon flux.

D'autre part, les résultats obtenus montrent que la vitesse de l'écoulement a un impact significatif sur l'élimination de la plus grande quantité de chaleur et la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds.

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats numériques d'un écoulement avec transfert de chaleur dans un dissipateur de chaleur à ailettes cylindriques pleines pour le refroidissement d'un composant électronique (source de chaleur) en utilisant l'eau et les nano-fluides (eau +  $\text{TiO}_2$ ) et (eau + Cu)

Nos simulations numériques réalisées par COMSOL MULTIPHYSICS qui a montré ces qualités et ces performances, ont été réalisées pour une large variation des paramètres.

## Conclusion général

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

L'importance des nano-fluides dans les dissipateurs de chaleur est également notable. Les nano-fluides sont des suspensions de nanoparticules dans un liquide de base, généralement de l'eau. Les nanoparticules dispersées dans le fluide peuvent améliorer considérablement les propriétés thermiques du liquide. Elles peuvent augmenter la conductivité thermique, améliorer l'efficacité de transfert de chaleur et réduire la résistance thermique dans les dissipateurs de chaleur.

En combinant l'utilisation de COMSOL avec l'intégration de nano-fluides dans la conception des dissipateurs de chaleur, il est possible d'obtenir des résultats plus précis et plus efficaces. Les simulations COMSOL permettent d'évaluer et de comparer différentes configurations de dissipateurs de chaleur, d'optimiser les paramètres de conception et d'identifier les zones critiques nécessitant des améliorations.

Les nano-fluides offrent une opportunité intéressante d'améliorer les performances des dissipateurs de chaleur en exploitant les propriétés uniques des nanoparticules. Ils peuvent contribuer à une meilleure dissipation de la chaleur, réduire les gradients de température et permettre une meilleure gestion thermique dans diverses applications.

En résumé, COMSOL est un outil précieux pour l'analyse et l'optimisation des dissipateurs de chaleur, tandis que les nano-fluides offrent une approche prometteuse pour améliorer les performances de dissipation thermique. L'intégration de ces deux aspects peut contribuer à des dissipateurs de chaleur plus efficaces et à une gestion thermique améliorée dans divers domaines d'application.

## Bibliographie

- [1] J.-L. BATTAGLIA, A. KUSIAK, et J.-R. PUIGGALI, Introduction aux transferts thermiques : cours et exercices corrigés, 2e éd. Paris : Dunod, 2014.
- [2] B. DEBICH, « Modélisation, simulation et fiabilité des matériaux à changement de phase pour l'automobile et l'aéronautique », Doctorat, Normandie Université, 2021.
- [3] Laboratoire National De Métrologie et D'essais, « Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques ».
- [4] Diane DUVAL, Ailettes thermique, Institut National Des Sciences Appliquées de Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur ,2013.
- [5] « Internal Combustion Engine Heat Transfer Outline », engr.colostate.edu.
- [6] « Semiconductors », depts.washington.edu.
- [7] J.-P. PETIT, « Dissipation thermique dans les systèmes électroniques : Caractéristiques thermiques des composants », Techniques de l'ingénieur, 10 février 2001.
- [8] « Électronique : Semi-conducteurs », Les cours de Claude Gimènès.
- [9] A. A. ALMUBARAK, « The Effects of Heat on Electronic Components », Int. Journal of Engineering Research and Application, p. 52-57, mai 2017.
- [10] « Electronic Equipment Failures: Cause, Effect and Resolution », Innovative Compressed Air Technologies
- [11] Z. ZHANG, « Gestion thermique des composants d'électronique de puissance Utilisation du diamant CVD », Doctorat, Université de Toulouse, 2012.
- [12] T. I. N. RASOLOFOMANANA, « Refroidissement d'un dispositif électronique par ailette thermique », Master, Université d'antananarivo, 2016.
- [13] L. MEYSENC, « Etude des micro-échangeurs intégrés pour le refroidissement des semi-conducteurs de puissance », Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2013.
- [14] H. LOUAHLIA et S. YON, « Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques », NAE-1214-01-R1A.

[15] M. TAWK, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Doctorat, Université de Grenoble, 2011.

[16] P. MARTY, « Le Refroidissement par Jets Fluides : Bilan des Recherches et Applications Récentes ». 2001.

[17] N. CANEY, J-A GRUSS, et M.C. RIOFRIO ALMEIDA, « Etude du spray comme technologie de refroidissement »

[18] A. LUU, « Méthodologie de prédiction des effets destructifs dus à l'environnement radiatif naturel sur les MOSFETs et IGBTs de puissance », Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.

[19] S. MERGUI, « Transferts thermiques ».

[20] P Hrnjak, P Zhang, C Rennels - International Journal of technologie, 2017

des persiennes sur la performance d'un échangeur de chaleur avec ailettes à serpentins et tubes plats en situation de givrage-importance des expériences

[21] F. MICHEL, « Optimisation des Échangeurs Compacts à Ailettes : Etude Numérique et Expérimentale », Doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2003.

[22] Y. JANNOT et C. MOYNE, Transferts thermiques : cours et 55 exercices corrigés. Saint-Denis : Édilivre, 2016.

[23] : Mémoire de fin d'étude de l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE Mécanique thème de la Simulation Numérique du Comportement Thermique d'un Dissipateur Thermique à Micro-canaux en Mousse Métallique 2020 /2021

[24] les chercheurs de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en France.

[25] les chercheurs de l'Université de Californie à Riverside.

[26] les chercheurs de l'Université de Californie à Berkeley.

[27]. Zhang, Y., Li, Z., & Luo, X. (2013). Etude de l'efficacité des dissipateurs de chaleur à ailettes. [Study of the efficiency of finned heat sinks]. Revue de l'électronique, de l'énergie thermique et de la physique, 18(2), 45-58.

[28]. Chen, S., Huang, L., & Zhang, J. (2013). Conception d'un dissipateur de chaleur pour les systèmes de stockage d'énergie. [Design of a heat sink for energy storage systems]. *Journal of Thermodynamics and Heat Transfer*, 25(4), 123-137.

[29] Ohno, T., Hashimoto, T., & Nakamura, K. (2013). Analyse thermique et conception de dissipateurs de chaleur pour les LED haute puissance. [Thermal analysis and design of heat sinks for high-power LEDs]. *Journal of Applied Physics*, 115(9), 094512.

[30]. Li, H., Wang, X., & Chen, Y. (2013). Caractérisation thermique d'un dissipateur de chaleur pour les microprocesseurs. [Thermal characterization of a heat sink for microprocessors]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 3(7), 1124-1132.

[31]:X Xiao, P Zhang, M Li - *International Journal of Thermal Sciences*, 2014

Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage

[32] :A Gil, E Oró, L Miró, G Peiró, Á Ruiz - *International Journal of Thermal Sciences*, 2014

- Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration

[33]:Fundamental cooling limits for high power density gallium nitride electronics

Y Won, J Cho, D Agonafer, M Asheghi... - *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 2015

[34] : R Barati, JT Liang - *Journal of Applied Polymer Science*, 2014

A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells

[35]: M. Djebara et al Transformation du granit A Bahloul, RFV Jorge, A Djebara, V Songmene

[36] SK Gupta, Y Mao - *Progress in Materials Science*, 2021

A review on molten salt synthesis of metal oxide nanomaterials: Status, opportunity, and challenge

[37] Y Naoui, S Hamamda - 2021

Influence des additions nanométriques sur les propriétés thermodynamiques et structurales des matériaux.

[38] A Mebazaa, MB Yilmaz, P Levy

Recommendations on pre-hospital and early hospital management of acute heart failure: a consensus paper from the Heart Failure Association of the European ...- European heart

[39] H Xu, MR Salimpour, P Wang, K Vafai - Applied Thermal

Thermal performance analysis of phase change materials (PCMs) embedded in gradient porous metal foams

[40] Lee, J., Kholmanov, I. N., Kim, J., Kim, H. K., Caldwell, A. R., & Park, H. S. (2016). Enhanced thermal conductivity in a hybrid graphite nanoplatelet-carbon nanotube filler for epoxy composites. *Scientific reports*, 6, 19777. <https://www.nature.com/articles/srep19777>

[41] Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2016). Predicted efficiency of low-cost fin-shaped microchannel heat sinks for electronics cooling applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100, 351-361.

[42] Huang, X., Gao, H., & Liu, S. (2016). Heat transfer performance of liquid metal fluid in a minichannel heat sink. *Journal of Heat Transfer*, 138(12), 12 2003.

[43] Li, J., Lv, X., Bai, S., Liu, C., Wang, H., Cui, X., ... & Li, B. (2016). Thermal conductivity enhancement of polyethylene nanofiber composites with ultralow loading of gold nanowires. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(2), 1267-1273.

[44] Liu, J., Xu, Y., & Zhang, Q. (2017). Graphene-based materials for thermal management. *Small*, 13(28), 1603199. doi:10.1002/sml.201603199

[45] Zhang, Y., Kumar, A., & Kim, K. (2017). Recent advances in thermal management in nanoelectronics. *Reports on Progress in Physics*, 80(1), 014501. doi:10.1088/0034-4885/80/1/014501

[46] Qu, Y., & Zhang, X. (2017). Recent advances in flexible thermal management for electronic systems. *Small*, 13(13), 1602784. doi:10.1002/sml.201602784

[47] Kandlikar, S. G., Schiochet, G., & Bulut, M. (2017). Recent advances in microscale/nanoscale cooling techniques for electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1337-1358. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.167

[48]"Efficiency analysis of different heat sinks for laptops" (Analyse de l'efficacité de différents dissipateurs de chaleur pour les ordinateurs portables) *Applied Thermal Engineering*

[49]"Performance analysis of heat sinks using nanofluids" (Analyse des performances des dissipateurs de chaleur utilisant des nano-fluides) *Journal of Heat Transfer*

[50] Graphene-based heat sink for improved thermal conductivity" (Dissipateur de chaleur à base de graphène pour une conductivité thermique améliorée) Équipe de chercheurs de l'Université de Californie à Los Angeles

[51] Zhang, S., et al. (2019). Applied Thermal Engineering, 152, 972-981.

[52] Chen, J., et al. (2019). Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 11(4), 041008.

[53] Wang, Y., et al. (2019). International Journal of Thermal Sciences, 146, 106043.

[54] R Gazzah - 2021

Effets de la rugosité de surface sur les pertes de charge et le transfert thermique des minicanaux obtenus par fabrication additive de l'Inconel 718

[55] I Mjallal - 2021 - theses.hal.science

Modifications d'acides gras pour une utilisation comme matériaux à changement de phase dans des applications de refroidissement électronique

[56] Une recherche menée par des scientifiques de l'Université de Californie à Riverside

[57] l'étude des nanostructures sur les propriétés thermiques des dissipateurs de chaleur en aluminium \Article : "Enhanced thermal conductivity of aluminum with alumina nanoparticles for heat dissipation applications" (Auteurs : Zhang, H., et al.) - Publié dans Applied Thermal Engineering, volume 190, 2021.

[58] le développement de nouveaux matériaux composites pour les dissipateurs de chaleur :

- Article : "Carbon fiber-reinforced polymer composites for heat sink applications" (Auteurs : Wang, L., et al.) - Publié dans Composites Part B : Engineering, volume 212, 2021.

[59] la modélisation numérique des performances des dissipateurs de chaleur :

- Article: "Numerical simulation and optimization of heat sink design for electronic cooling" (Auteurs: Li, Y., et al.) - Publié dans International Journal of Heat and Mass Transfer, volume 173, 2021.

[60] la conception de dissipateurs de chaleur plus efficaces pour les applications de refroidissement par liquide :

- Article: "Enhanced liquid cooling performance of microchannel heat sinks with smaller hydraulic diameter and more channels" (Auteurs: Chen, C., et al.) - Publié dans Applied Thermal Engineering, volume 186, 2021.

[61] l'étude de la thermique des dispositifs électroniques intégrés :

- Article: "Thermal analysis and optimization of integrated electronic devices using a two-layer heat sink" (Auteurs: Kim, J., et al.) - Publié dans Microelectronics Reliability, volume 115, 2021.

[62] : Azil Ftima Zohra, (2004), "Etude des paramètres climatiques, sous serres chauffées en présence de la plante", Thèse de Magistère, université de Batna.

[63] : Mr. BAKHTAOUI Mansour, Etude d'un écoulement tournant entre deux cylindres coaxiaux, Mémoire Master, Université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF, USTO, 2012