



الجمهورية الجزائرية  
الديبلوماسية الشعبية

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

**Université Echahid Echikh Larbi Tébessi –Tébessa –**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Mécanique**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention de **Master Académique**

**Spécialité : Énergétique**

**Par : Guefaifia Iyed**

# **Efficient Electronics Cooling through Nanofluid- Based Numerical Analysis**

Présenté et soutenu publiquement, le 11/06/2024, devant le jury composé de :

Président :	Belazizia Abdennacer	Professeur
Encadreur :	Bouznada Tarek	MAB
Examineur :	Chelloug Fatima-Zohra	MAA

**Promotion : 2023/2024**

# Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu le Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a accordées afin de réaliser ce modeste travail. Je tiens évidemment à débiter mes remerciements par mon encadrant :*

*Dr bouznada tarek pour la confiance qu'il m'a accordée sur ce sujet, pour les discussions fructueuses tout au long du travail, ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils*

*Mes remerciements vont aussi au président et aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail*

*Je remercie également tous les enseignants de l'université de Larbi Tébessi – Tébessa –, faculté de sciences et technologie, département de génie mécanique*

*Enfin, j'exprime Mes remerciements à tous qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail,*

*Tout d'abord, aux deux anges qui m'ont éclairé le chemin,  
En me donnant la main tout au long de mes années d'étude, c'est  
deux anges sont ma reine Oummi, et Abi Allah yarhmo, qui  
aurait été fier de moi aujourd'hui.*

*Je voudrais, aussi, dédier cet effort à mes sœurs Asma et  
Chaïma,*

*À tous mes amis et tous mes collègues, de près ou de loin, à tous  
ceux qui me sont chers.*

# Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumés	
Sommaire	
Nomenclatures	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralité et analyse bibliographie</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Transfert de chaleur .....	3
I.3 Transfert de chaleur par convection .....	3
I.4 Transfert de chaleur par convection forcée .....	4
I.5 Refroidissement des système électroniques .....	4
I.6 Le rôle du refroidissement pour le fonctionnement de l'électronique .....	5
I.7 Les méthodes de Refroidissement .....	5
I.7.1 Refroidissement par Air .....	5
I.7.2 Refroidissement par Liquide .....	6
I.7.3 Refroidissement à Effet Peltier .....	7
I.7.4 Refroidissement par Rayonnement .....	7
I.8 Les méthodes traditionnelles de refroidissement dans les systèmes électroniques .....	7
I.9 Les nanofluides .....	8
I.10 Effets nano-fluidiques sur les performances thermo-hydrauliques .....	9
I.11 Les Avantages et l'Inconvénients de l'utilisation de nano fluides .....	9

I.12 Analyse bibliographique .....	10
------------------------------------	----

## **Chapitre II : Modèle Mathématique**

II.1 Introduction .....	16
II.2 Les formules mathématique du problème .....	16
II.2.1 Pour un fluide de base (fluide pure) .....	16
II.2.2 Pour un nanofluide .....	17
II.3 Les propriétés de nanofluide .....	17
II.3.1 La viscosité dynamique $\mu_{nf}$ .....	18
II.3.2 La masse volumique $\rho_{nf}$ .....	18
II.3.3 Conductivité thermique $\lambda_{nf}$ .....	18
II.3.4 La chaleur spécifique ( $C_p$ ) .....	19
II.4 Nombre de Nusselt .....	19
II.4.1 Le nombre de Nusselt local ( $Nu(x)$ ) .....	20
II.4.2 Le nombre de Nusselt moyen ( $Nu$ ) .....	20

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1 Introduction .....	21
III.2 Présentation du comsol .....	21
III.3 Les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) .....	22
III.3 Description du problème .....	23
III.5 Indépendance de maillage .....	24
III.6 Résultats et discussion .....	25
III.6.1 L'effet de la vitesse d'entrée .....	25
III.6.2 L'effet de la vitesse d'entrée sur champ de température .....	26
III.6.3 L'effet de la température froide $T_f$ sur champ de température .....	26
III.6.4 L'effet de concentration $\varphi$ sur le champ de température .....	27
III.6.5 L'effet de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt local .....	28

III.6.6 L'effet de la température froide sur le nombre de Nusselt local .....	29
III.6.8 Effet de vitesse d'entrée sur Nusselt moyen .....	30
III.6.9 L'effet de la température froide sur nombre de Nusselt moyen .....	31
III.6.10 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen .....	32
III.6.11 L'effet de la vitesse d'entrée sur le champ de température .....	33
III.6.12 L'effet de la température froide $T_f$ sur champ de température .....	33
III.6.13 L'effet de concentration $\varphi$ sur le champ de température .....	34
III.6.14 L'effet de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt local .....	35
III.6.15 L'effet de la température froide sur le nombre de Nusselt local .....	36
III.6.16 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt local .....	37
III.6.17 L'effet de la vitesse d'entrée sur Nusselt moyen .....	37
III.6.18 L'effet de la température froide sur nombre de Nusselt moyen .....	38
III.6.19 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen .....	39
III.7 Comparaison entre la premier et le deuxième cas .....	39
Conclusion générale .....	47
Bibliographie	

## Résumé

Cette étude numérique explore l'utilisation des fluides nanofluides pour le refroidissement des composants électroniques. Elle analyse l'impact de la vitesse et de la température d'entrée du liquide de refroidissement, ainsi que de différentes concentrations de nanoparticules dans deux configurations différentes. Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse du liquide améliore le refroidissement, par conséquent accroît également la charge thermique. De plus, une baisse de la température du liquide entraîne une meilleure efficacité de refroidissement. L'ajout de nanoparticules augmente la conductivité thermique du liquide, avec une augmentation correspondante du transfert de chaleur et donc du refroidissement. Enfin, une augmentation du nombre de composants électroniques nécessite sur le taux de refroidissement plus élevés.

**Mots-clés :** Transfert de chaleur, refroidissement des composants électroniques, température froide, nanofluide.

## **Abstract**

This numerical study explores the use of nanofluids for cooling electronic components. It analyzes the impact of the velocity and inlet temperature of the coolant fluid, as well as different concentrations of nanoparticles in two different configurations. The results show that increasing the fluid velocity enhances cooling but also increases the thermal load. Additionally, a decrease in the coolant temperature leads to improved cooling efficiency. Adding nanoparticles increases the thermal conductivity of the fluid, resulting in a corresponding increase in heat transfer and therefore cooling. Finally, an increase in the number of electronic components requires higher cooling rates.

**Key words** : heat transfer, electrical compounds, cooling electronic components, cold temperature, nanofluid

## ملخص

هذه الدراسة العددية تستكشف استخدام السوائل النانوية لتبريد الأجزاء الإلكترونية. وتحليل تأثير سرعة ودرجة حرارة دخول سائل التبريد، بالإضافة إلى تراكيز مختلفة من الجزيئات النانوية في تكوينين مختلفين. تشير النتائج إلى أن زيادة سرعة السائل تعزز التبريد، ولكنها تزيد أيضًا من الحمل الحراري. بالإضافة إلى ذلك، فإن انخفاض درجة حرارة السائل يؤدي إلى زيادة في كفاءة التبريد. إضافة الجزيئات النانوية تزيد من التوصيل الحراري للسائل، مع زيادة مقابلة في نقل الحرارة وبالتالي التبريد. وأخيرًا، زيادة عدد الأجزاء الإلكترونية يتطلب معدلات تبريد أعلى.

كلمات مفتاحية: انتقال حراري، عناصر الكترونيه، تبريد الأجزاء الإلكترونية، سائل نانوي

## Liste de Figure

<b>Numéro de Figure :</b>	<b>Titre de la figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 1.1</b>	Transfer de chaleur par convection d'un convecteur électrique.	<b>3</b>
<b>Figure 1.2</b>	Exemple de Convection forcée par un ventilateur.	<b>4</b>
<b>Figure 1.3</b>	Exemple du processus de refroidissement d'une pièce électronique	<b>5</b>
<b>Figure 1.4</b>	Exemple de refroidissement d'une pièce électronique par l'air	<b>6</b>
<b>Figure 1.5</b>	Schéma explique le circuit de refroidissement par liquide	<b>6</b>
<b>Figure 1.6</b>	Schéma représentant la construction d'un module Peltier	<b>7</b>
<b>Figure 1.7</b>	Le Domaine physique	<b>11</b>
<b>Figure 1.8</b>	Variation de Nu en fonction de Re	<b>11</b>
<b>Figure 1.9</b>	La variation du nombre moyen de Nusselt en fonction de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh	<b>11</b>
<b>Figure 1.10</b>	Impact des valeurs et de la direction de la rotation du cylindre sur le nombre de Bejan moyen pour trois nombres de zigzags sur la paroi chaude	<b>13</b>
<b>Figure 1.11</b>	Impact des valeurs et de la direction de la rotation du cylindre sur le nombre de Nusselt moyen pour trois nombres de zigzags sur la paroi chaude.	<b>13</b>
<b>Figure 1.12</b>	Le domaine physique.	<b>14</b>
<b>Figure 1.13</b>	Effet de concentration de différentes nanoparticules sur la résistance thermique.	<b>14</b>

<b>Figure 1.14</b>	Schéma de principe du système solaire thermique photovoltaïque (PV / T) avec nanofluide comme moyen de refroidissement.	<b>15</b>
<b>Figure 3.1</b>	Logiciel comsol multiphysics.	<b>22</b>
<b>Figure 3.2</b>	Nanostructure de MWCNT.	<b>22</b>
<b>Figure 3.3</b>	Domaine de calcule.	<b>23</b>
<b>Figure 3.4</b>	Maillage utilisé.	<b>24</b>
<b>Figure 3.5</b>	Champs de vitesse en utilisant différentes vitesses d'entrée.	<b>25</b>
<b>Figure 3.6</b>	Champs de températures en utilisant différentes vitesses d'entrée.	<b>26</b>
<b>Figure 3.7</b>	Champs de température en utilisant différentes températures froides.	<b>27</b>
<b>Figure 3.8</b>	Champs de température en utilisant différentes valeurs de concentration.	<b>28</b>
<b>Figure 3.9</b>	Nusselt locale en impliquant différentes vitesses d'entrée.	<b>29</b>
<b>Figure 3.10</b>	Nusselt locale en impliquant différentes températures froides.	<b>29</b>
<b>Figure 3.11</b>	Nusselt locale en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules.	<b>30</b>
<b>Figure 3.12</b>	Nusselt moyen en impliquant différentes vitesses d'entrée.	<b>31</b>
<b>Figure 3.13</b>	Nusselt moyen en impliquant différentes températures froides.	<b>31</b>
<b>Figure 3.14</b>	Nusselt moyen en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules.	<b>32</b>
<b>Figure 3.15</b>	Domaine de calcule de deuxième cas.	<b>32</b>
<b>Figure 3.16</b>	Champs de température en utilisant différentes vitesses d'entrée.	<b>33</b>
<b>Figure 3.17</b>	Champs de température en utilisant différentes températures froides.	<b>34</b>
<b>Figure 3.18</b>	Champs de température en utilisant différentes valeurs de concentration.	<b>35</b>

<b>Figure 3.19</b>	Nusselt local en impliquant différentes vitesses d'entrée.	<b>36</b>
<b>Figure 3.20</b>	Nusselt local en impliquant différentes températures froides.	<b>36</b>
<b>Figure 3.21</b>	Nusselt local en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules.	<b>37</b>
<b>Figure 3.22</b>	Nusselt moyen en impliquant différentes vitesses d'entrée.	<b>38</b>
<b>Figure 3.23</b>	Nusselt moyen en impliquant différentes températures froides.	<b>38</b>
<b>Figure 3.24</b>	Nusselt moyen en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules $\phi$ .	<b>39</b>
<b>Figure 3.25</b>	Comparaison entre la premier et le deuxième cas.	<b>40</b>

## Liste de tableau

<b>Numéro de tableau</b>	<b>Titre de tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 3-1</b>	Propriétés thermo-physiques de l'eau et nanoparticule utilisé.	<b>23</b>
<b>Tableau 3-2</b>	Nusselt moyen en utilisant différents maillages (l'eau pure).	<b>24</b>

## Nomenclatureur

### Lettres latines

D	La hauteur de canal/ Diamètre hydraulique	m
L	La longueur de canal	m
T	La température	°C
$T_f$	Température froide	°C
$T_c$	Température chaude	°C
U	La vitesse d'entrée	m/s
$u, v$	Composantes de la vitesse dans les directions x,y	m/s
x,y	Les coordonnées cartésiennes	
$C_p$	Chaleur spécifique	J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
h	Le coefficient d'change par convection	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
Q	Densité de flux	W/m <sup>2</sup>
Nu	Nombre de Nusselt	
$\overline{Nu}$	Nombre de Nusselt moyen	

### Symbole Grecque

$\lambda$	La conductivité thermique	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\mu$	La viscosité dynamique	Pa.s
$\rho$	La masse volumique du fluide	Kg.m <sup>-3</sup>
$\varphi$	La concentration de nanoparticules	

### Indice

$f$	Fluide de base
$nf$	Nanofluide
$s$	Nanoparticule

# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

### Introduction générale :

Les évolutions récentes des systèmes électroniques ont conduit à une augmentation de l'énergie des appareils et donc à une augmentation de la température de ces derniers, nécessitant le développement des technologies de refroidissement.

Malgré les progrès, qui ont été réalisés dans ce domaine, il existe encore des défis techniques dans la gestion thermique et dans le contrôle des appareils électroniques et dans celui des processeurs.

L'objectif d'aujourd'hui est d'éliminer, de manière adéquate, le flux de chaleur et les pertes d'énergie, et de dépasser les méthodes traditionnelles de refroidissement qui considèrent la convection forcée comme l'une des méthodes les plus prometteuse, capables d'atteindre un rendement élevé, mais d'autre part, il ne peut pas atteindre les résultats attendus en raison des restrictions imposées aux capacités des fluides caloporteurs, sachant que pour les caloporteurs traditionnels (tels que l'air, l'huile, le méthanol...) ont de faibles propriétés de transfert. Citant que, pour obtenir des liquides de refroidissement, avec une plus grande conductivité thermique, on a, toujours, recours aux nanofluides, qui sont une nouvelle catégorie de liquides caloporteurs, et qui sont des suspensions de particules de taille nanométrique. Les nanofluides peuvent fournir une efficacité de refroidissement élevée, en ligne avec le développement des appareils électroniques.

Dans le présent travail, nous étudierons l'effet des nanoparticules, la vitesse et la température d'entrée sur le processus de refroidissement d'un composant électronique dans une conduite rectangulaire. L'objectif est d'optimiser le processus de transfert de chaleur en améliorant le taux de refroidissement, ce qui augmente la durée de vie du composant électronique.

Le contenu de ce mémoire est réparti sur 3 chapitres :

- ✓ Le 1er chapitre présente des généralités sur le refroidissement par convection forcée, et sur les nanofluides.
  
- ✓ Le 2ème chapitre présente le modèle mathématique qui contient un ensemble d'équations décrivant la convection forcée et les propriétés thermo-physiques des nanofluides.

## Introduction générale

---

- ✓ Le 3ème chapitre ‘Résultats et discussions’, présente la simulation dans COMSOL, qui nous fournit un ensemble de champs et de courbes décrivant le phénomène étudié, en discutant les résultats obtenus.

# **Chapitre I : Généralité et analyse bibliographie**

### I.1 Introduction :

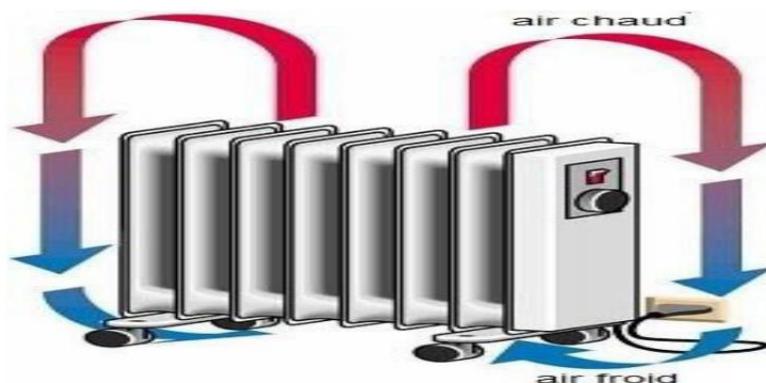
Dans ce chapitre nous donnerons un aperçu théorique du refroidissement en général et du refroidissement par les nanofluides, où nous parlerons des méthodes de refroidissement régulières et traditionnelles et de certains de leurs inconvénients. Nous présenterons ensuite l'une des techniques permettant d'améliorer le refroidissement, qu'est l'utilisation de nanofluides. Mentionnant certains de ses avantages, après cela nous présenterons quelques études antérieures que nous aborderons des sujets similaires à ceux que nous étudierons dans ce mémoire.

### I.2 Transfert de chaleur :

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final. Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique (Arbaoui ; 2021)

### I.3 Transfert de chaleur par convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a eu lieu dans les fluides liquides ou gaz en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui échangent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement entre elles (Benmerabet ; 2018)

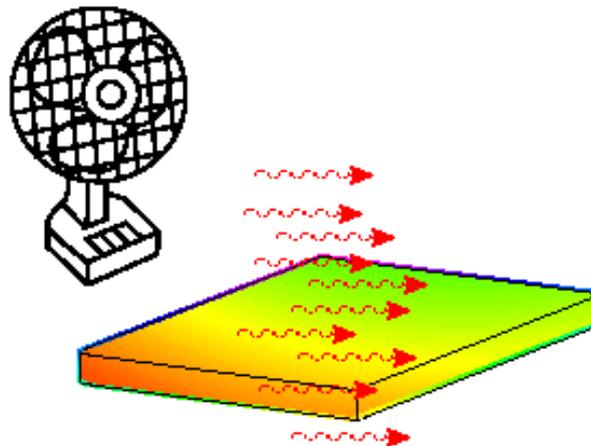


**Figure I.1** Transfert de chaleur par convection d'un convecteur électrique.

#### I.4 Transfert de chaleur par convection forcée :

Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc...) ; c'est un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

Généralement, le refroidissement se fait par convection forcée et par changement de phase, cependant, la convection naturelle est une partie intégrante de la dissipation de chaleur surtout dans le cas des ordinateurs portables et les appareils électroniques de petite dimension. Les études de convection forcée sont nécessaires à la gestion des flux thermiques et la conception des équipements (les capteurs solaires, fabrication des panneaux solaires, ...). (Ferradji et Laib ; 2023)



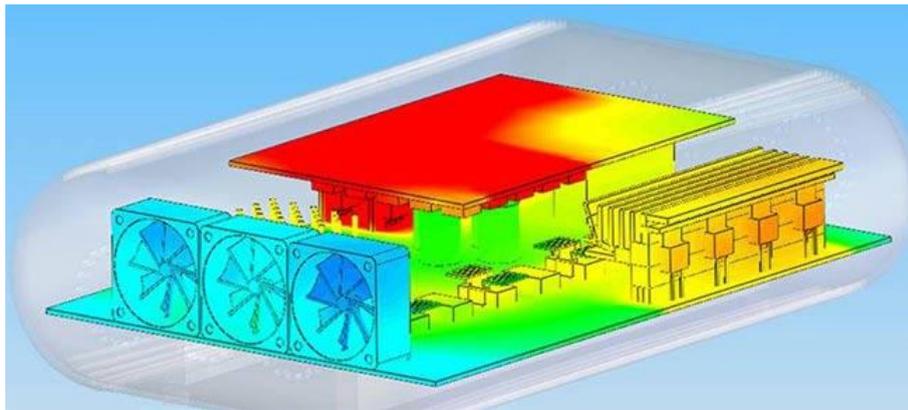
**Figure I.2** Exemple de Convection forcée par un ventilateur.

#### I.5 Refroidissement des système électroniques :

Le refroidissement des systèmes électroniques fait référence au processus de dissipation de la chaleur générée par les composants électroniques afin de maintenir leur température à un niveau optimal pour un fonctionnement efficace et fiable. Cela peut impliquer l'utilisation de diverses méthodes de refroidissement telles que des dissipateurs thermiques, des ventilateurs, des chambres à vapeur, ou même des systèmes de refroidissement liquide pour empêcher la surchauffe des composants et protéger ainsi le matériel électronique.

## I.6 Le rôle du refroidissement pour le fonctionnement de l'électronique :

L'excès de chaleur dans les appareils raccourcit leur durée de vie, limite leurs capacités et conduit souvent à des dommages inévitables aux systèmes électroniques. Le bon choix des éléments de refroidissement évite tous ces effets négatifs. Pour les concepteurs, c'est un grand défi, car de nombreux facteurs doivent être pris en compte – les paramètres techniques de l'équipement et les dimensions sont importants. Cela ne sera également pas possible sans effectuer les calculs appropriés. Il convient de rappeler, cependant, que malgré les meilleurs systèmes de dissipation thermique, nous, en tant qu'utilisateurs, avons toujours un impact énorme sur la durée de vie des appareils, en assurant un espace suffisant pour la circulation de l'air et en les utilisant uniquement comme prévu. [1]



**Figure I.3** Un exemple du processus de refroidissement d'une pièce électronique

## I.7 Les méthodes de Refroidissement :

Le refroidissement électronique est essentiel pour maintenir les performances et assurer la longévité des dispositifs électroniques. Il existe diverses méthodes de refroidissement électronique qui sont couramment utilisées pour gérer la dissipation de chaleur des composants électroniques. Voici quatre méthodes de refroidissement électrique couramment utilisées dans diverses applications.

### I.7.1 Refroidissement par Air :

C'est la méthode de refroidissement la plus courante et la plus simple. Elle utilise l'air ambiant comme milieu de refroidissement pour dissiper la chaleur produite par les composants électroniques. Les ventilateurs, les dissipateurs thermiques et les autres dispositifs de

refroidissement par air sont généralement utilisés pour améliorer la convection et accélérer le transfert de chaleur à l'air ambiant.

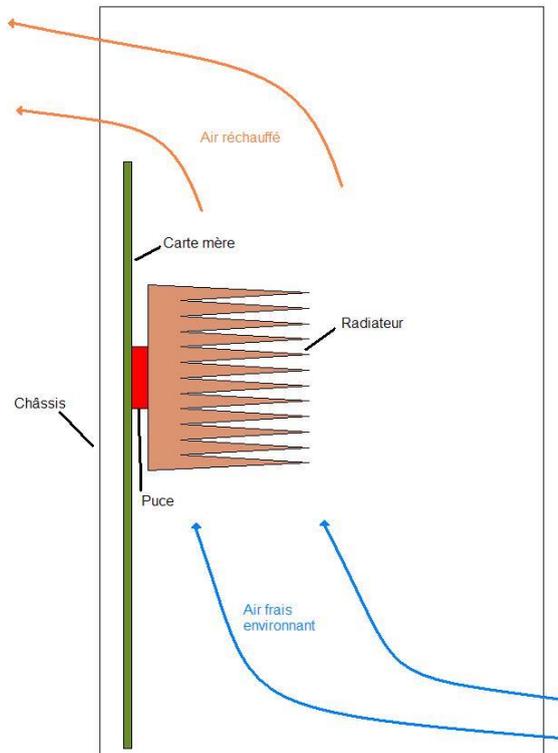


Figure I.4 Exemple de refroidissement d'une pièce électronique par l'air.

**I.7.2 Refroidissement par Liquide :**

Le refroidissement liquide, ou refroidissement par eau, est une méthode efficace pour refroidir les composants électroniques de haute puissance. Cette technique utilise un liquide, généralement de l'eau ou un fluide caloporteur, pour transférer la chaleur des composants électroniques à un échangeur de chaleur où elle est ensuite dissipée à l'air ambiant.

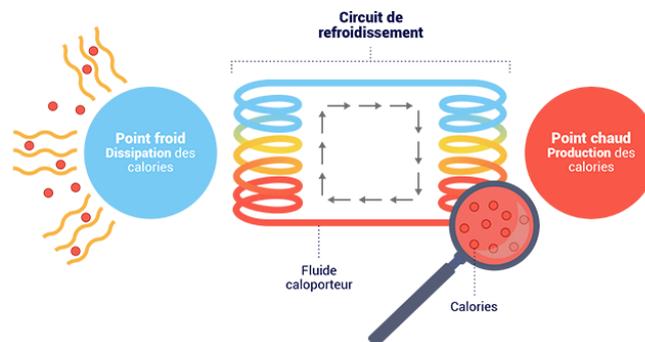


Figure I.5 Schéma explique le circuit de refroidissement par liquide.

### I.7.3 Refroidissement à Effet Peltier :

L'effet Peltier exploite le thermocouple électrique pour créer une différence de température entre les deux côtés du module Peltier, résultant en un transfert de chaleur. Cette méthode est particulièrement utile pour les applications où l'espace est limité et une régulation précise de la température est nécessaire

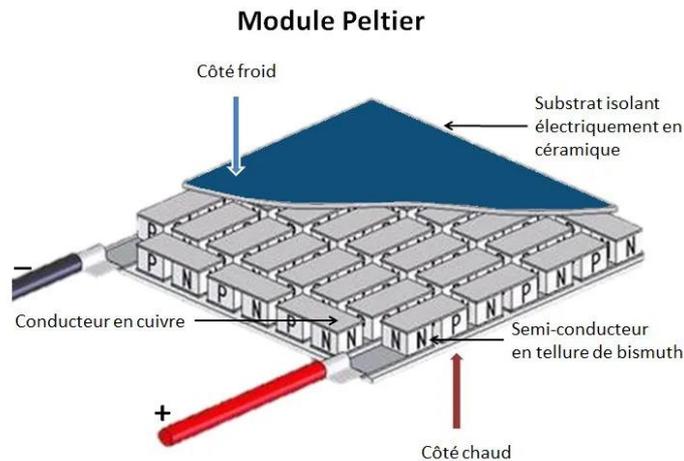


Figure I.6 Schéma représentant la construction d'un module Peltier.

### I.7.4 Refroidissement par Rayonnement :

Le refroidissement par rayonnement utilise la radiation thermique pour dissiper la chaleur des surfaces chaudes vers l'environnement plus froid. Cette méthode est souvent utilisée en combinaison avec d'autres méthodes de refroidissement pour augmenter l'efficacité de la dissipation de chaleur. [2]

### I.8 Les méthodes traditionnelles de refroidissement dans les systèmes électroniques :

Les systèmes électroniques de refroidissement présentent plusieurs inconvénients qui peuvent affecter la durée de vie et les performances de la pièce électronique., notamment :

- ✓ *Limites de dissipation thermique* : Les composants électroniques modernes génèrent de plus en plus de chaleur en raison de leur densité de puissance croissante. Les méthodes traditionnelles de refroidissement peuvent atteindre leurs limites de dissipation thermique, entraînant une augmentation de la température des composants et des performances réduites, voire des défaillances.

- ✓ *Encombrement et poids* : Les dissipateurs thermiques, les ventilateurs et les systèmes de refroidissement par liquide peuvent ajouter de l'encombrement et du poids aux appareils électroniques, ce qui peut être contraignant dans les applications où l'espace et le poids sont des contraintes importantes.
- ✓ *Énergie et consommation électrique* : Les ventilateurs et les systèmes de refroidissement par liquide nécessitent de l'électricité pour fonctionner, ce qui peut augmenter la consommation d'énergie des appareils électroniques. Dans certains cas, cette consommation d'énergie supplémentaire peut nécessiter un dimensionnement plus important de l'alimentation électrique, ce qui entraîne des coûts supplémentaires et une empreinte environnementale accrue.
- ✓ *Fiabilité et durabilité* : Les composants utilisés dans les systèmes de refroidissement traditionnels, tels que les ventilateurs et les pompes, sont sujets à l'usure et aux pannes, ce qui peut réduire la fiabilité et la durabilité globales du système électronique.
- ✓ *Efficacité thermique* : Les méthodes traditionnelles de refroidissement peuvent ne pas être assez efficaces pour répondre aux exigences de refroidissement dans les environnements extrêmes ou dans les applications à haute performance, ce qui nécessite souvent des solutions plus avancées et plus efficaces.

En résumé, bien que les méthodes traditionnelles de refroidissement aient été largement utilisées et se soient révélées efficaces dans de nombreuses applications, elles rencontrent des défis croissants avec l'évolution des exigences en matière de densité de puissance, de compacité, d'efficacité énergétique et de fiabilité dans les systèmes électroniques modernes.

### **I.9 Les nanofluides :**

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'améliorer certaines propriétés. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nanofluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des

nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange. (João-Paulo ; 2009)

### **I.10 Effets nano-fluidiques sur les performances thermo-hydrauliques :**

La conductivité thermique d'un matériau est une mesure de sa capacité à conduire la chaleur. Pour les liquides de refroidissement et les fluides caloporteurs (également appelés fluides thermiques ou huiles thermiques), une conductivité thermique élevée est souhaitée. De nombreux nanomatériaux offrent de grandes propriétés thermo-conductrices. Afin d'utiliser la conductivité thermique supérieure des nanomatériaux, on utilise ce qu'on appelle des nanofluides comme liquides de refroidissement. Un nanofluide est un fluide dans lequel des particules de taille nanométrique sont en suspension dans un fluide de base comme l'eau, le glycol ou l'huile, où elles forment une solution colloïdale. Les nanofluides peuvent augmenter considérablement la conductivité thermique par rapport aux liquides sans nanoparticules ou aux particules plus grosses. Le matériau, la taille, la viscosité, la charge de surface et la stabilité du fluide des nanoparticules dispersées affectent considérablement les performances thermiques des nanofluides. Les nanofluides gagnent rapidement en importance dans les applications de transfert thermique car ils présentent des performances de transfert thermique supérieures à celles des fluides de base conventionnels. La dispersion par ultrasons est une technique très efficace, fiable et bien établie dans l'industrie pour produire des nanofluides avec des capacités de transfert de chaleur très performantes.

En résumé, les nanofluides présentent des propriétés améliorées telles qu'une conductivité thermique accrue, une meilleure capacité de transfert de chaleur, une stabilité thermique améliorée et une réduction de la formation de dépôts, ce qui se traduit par une efficacité de refroidissement globalement améliorée dans une variété d'applications industrielles et technologiques.

### **I.11 Les Avantages et l'Inconvénients de l'utilisation de nanofluides :**

#### **✓ *Avantage des nanofluides :***

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Les nanofluides permet d'améliorer l'efficacité de refroidissement des systèmes électroniques.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.

- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur. Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

✓ *Inconvénients des nanofluides ;*

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production. ([Benosman et belgroum 2017](#))

### **I.12 Analyse bibliographique :**

Il existe plusieurs études récentes qui ont abordé des sujets similaires à notre sujet, qui traite du refroidissement par nanofluides, et nous donnerons ci-dessous un bref aperçu de certaines études similaires à notre sujet

#### **Etude 1**

**Krishna et Kumar (2019)**. Ils ont mené une étude numérique qui utilise deux nanofluides différents pour déterminer les effets de ces nanofluides sur les comportements thermiques et de flux. Les résultats ont montré que le taux de transfert de chaleur augmentait avec l'augmentation des nanoparticules et avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

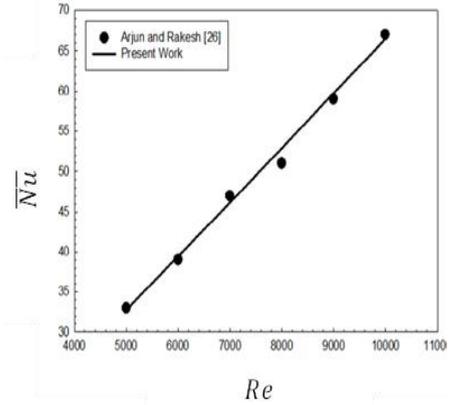
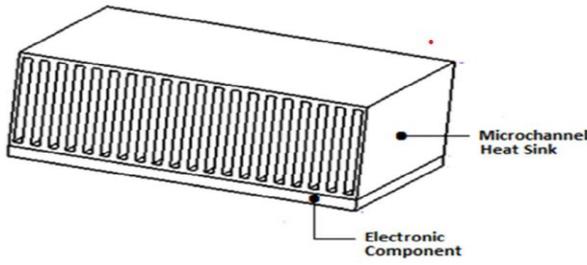


Figure 1.7 Le Domaine physique. Krishna and kumar ; 2019.

Figure 18 Variation de Nu en fonction de Re. Krishna and Kumar ; 2019.

Etude 2

Soufi el Habib (2013) Il a étudié l'écoulement de l'oxyde d'aluminium et des nanofluides dans une cavité en forme de U, et a résolu les équations mathématiques liées au sujet à l'aide du simulateur Fluent. Il a obtenu des résultats montrant que l'augmentation du nombre de Rayleigh a un effet positif sur le transfert thermique. du nanofluide, améliorant ainsi le niveau de refroidissement.

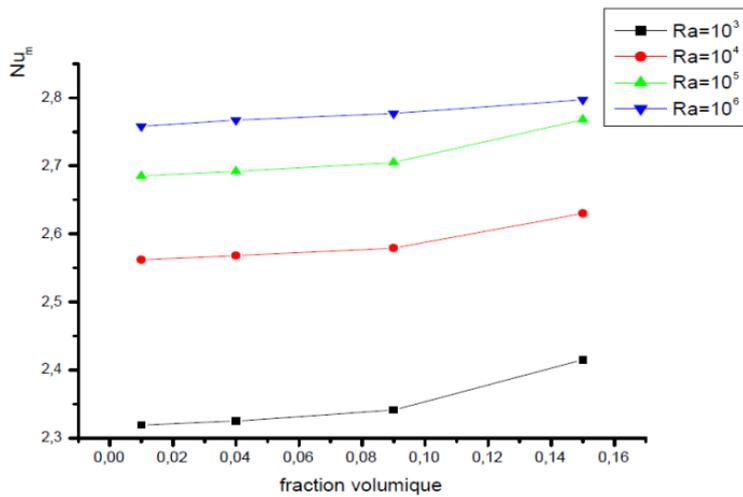


Figure 1.9 La variation du nombre moyen de Nusselt en fonction de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh. Soufi el Habib (2013)

**Etude 3**

CHADI (2020) a exploré l'amélioration du refroidissement des composants électroniques à l'aide de nanofluides, en se concentrant sur les écoulements convectifs en régime laminaire et stationnaire. Les simulations numériques ont examiné divers aspects, notamment l'effet des géométries de mini-canaux, des types et concentrations de nanofluides, ainsi que l'ajout d'obstacles et d'ailettes dans les canaux, ainsi que l'utilisation de nanofluides diamant-eau, ont amélioré le transfert de chaleur. De plus, l'augmentation de la concentration de nanoparticules dans l'eau de base a également conduit à une amélioration du coefficient de transfert de chaleur.

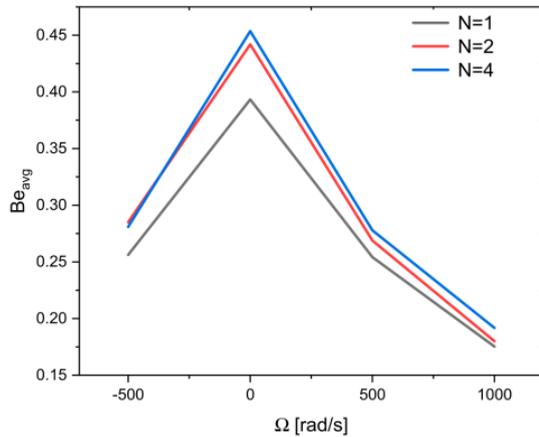
**Etude 4**

Labidi (2021) a introduit une simulation numérique de la convection forcée des nanofluides en régime laminaire stationnaire à l'intérieur d'une conduite de section rectangulaire. Les nanofluides utilisés dans cette étude sont le Cu-eau, l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau et le TiO<sub>2</sub>-eau. La discrétisation des équations gouvernantes a été réalisée en utilisant la méthode des volumes finis, suivie de la résolution itérative du système d'équations algébriques obtenues. Les résultats indiquent que l'utilisation des nanofluides a un impact significatif sur toutes les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques de l'écoulement. Une augmentation de la fraction volumique entraîne une augmentation du coefficient d'échange convectif moyen et de la chute de pression. De plus, une augmentation de la vitesse d'écoulement améliore le taux de transfert de chaleur mais augmente également les pertes de charge pour les trois types de nanofluides. Les résultats confirment également que le nanofluide Cu-eau offre une meilleure performance thermique par rapport à l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau et au TiO<sub>2</sub>-eau. Enfin, l'utilisation du nanofluide Cu-eau se traduit par un meilleur transfert de chaleur avec une chute de pression moins importante.

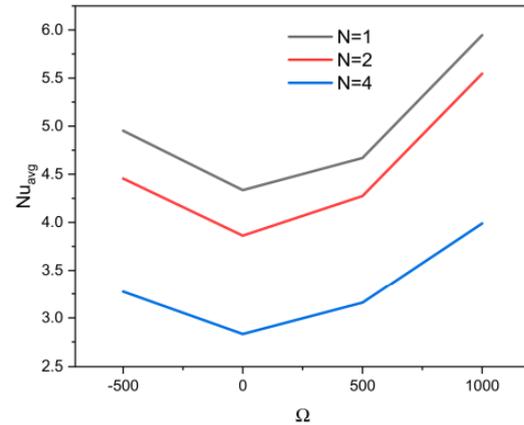
**Etude 5**

Abderrahmane et al (2022) ont fait un article sur les nanofluides, L'objectif de cette étude était d'analyser numériquement le transfert de chaleur mixte dans une enceinte triangulaire tridimensionnelle avec un cylindre circulaire en rotation au centre, Des simulations numériques ont été réalisées en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) pour étudier le comportement d'un nanofluide hybride Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MWCNT-Eau. Divers paramètres ont été pris en compte, Les résultat suggèrent que pour améliorer les taux de transfert de chaleur du nanofluide hybride dans une cavité poreuse triangulaire tridimensionnelle avec un cylindre rotatif et sous l'effet

d'un champ magnétique, il est recommandé d'avoir un nombre de Darcy supérieur à  $10^{-3}$ , un nombre de Hartmann inférieur à 0, des zigzags sur la surface chaude, et une vitesse de rotation supérieure à 500 dans la direction de l'écoulement.



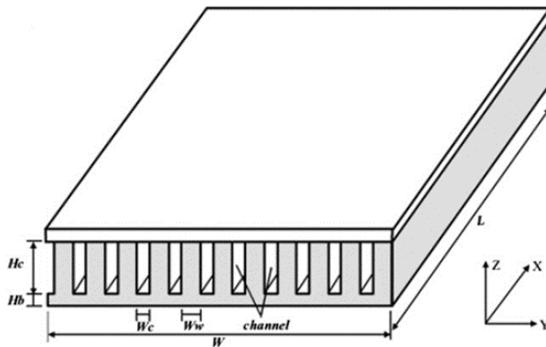
**Figure 1.10** Impact des valeurs et de la direction de la rotation du cylindre sur le nombre de Bejan moyen pour trois nombres de zigzags sur la paroi chaude. [Abderrahmane et al \(2022\)](#)



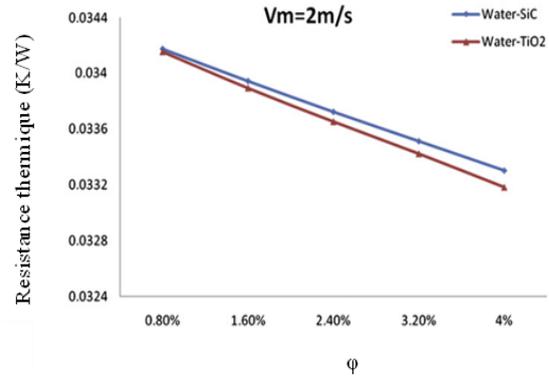
**Figure 1.11** Impact des valeurs et de la direction de la rotation du cylindre sur le nombre de Nusselt moyen pour trois nombres de zigzags sur la paroi chaude. [Abderrahmane et al \(2022\)](#)

### Etude 6

Ali et Saidur (2011) Ils ont fait une étude sur l'utilisations des nanofluides avec différentes fractions volumiques dans un dissipateur thermique à mini canal est analysé pour l'écoulement turbulent de nanofluides SiC-eau et TiO<sub>2</sub>-eau en tant que liquides de refroidissement à travers des diamètres hydrauliques, les résultats montrés qu'une augmentation de 12,44 % de la conductivité thermique avec une concentration volumique de SiC de 4 %, et de 9,99 % avec TiO<sub>2</sub> pour la même concentration. L'utilisation du nanofluide SiC-eau a permis une amélioration de 7,25 % à 12,43 % par rapport à l'eau, et de 7,63 % à 12,77 % avec TiO<sub>2</sub>. La puissance de pompage maximale avec SiC-eau à 2 m/s et 4 % de volume était de 0,28 W, et de 5,39 W à 6 m/s. Avec TiO<sub>2</sub>-eau à 2 m/s et 4 % de volume, elle était de 0,29 W, et de 5,64 W à 6 m/s, pour le même volume de 4 %.



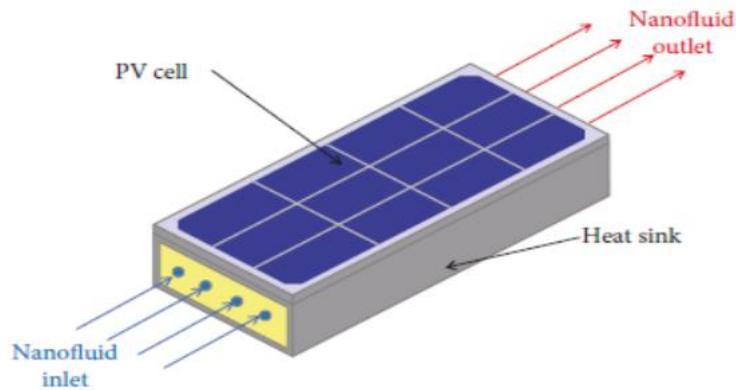
**Figure 1.12** Le domaine physique. [Ali et Saidur \(2011\)](#)



**Figure 1.13** Effet de concentration de différentes nanoparticules sur la résistance thermique. [Ali et Saidur \(2011\)](#)

### Etude 7

Bakhti et Saim (2021) ont rédigé un article sur l'utilisation des nanofluides dans l'énergie solaire, Cet article propose une analyse de l'intégration des nanofluides et de leurs applications dans le domaine de l'énergie solaire. Plusieurs facteurs influencent les propriétés physiques des nanofluides. Utiliser les nanofluides comme fluide absorbant s'avère une méthode efficace pour améliorer le transfert de chaleur dans les dispositifs d'énergie solaire. L'objectif principal de cette revue est d'examiner et de classer toutes les formules et corrélations existantes concernant les propriétés physiques et les modèles physiques des nanofluides, incluant la conductivité thermique, la viscosité, la masse volumique et la chaleur spécifique, ainsi que de résumer les recherches menées récemment sur les applications des nanofluides dans les systèmes d'énergie solaire. Cet article identifie également les perspectives de recherche futures dans le domaine de l'énergie solaire.



**Figure 1.14** Schéma de principe du système solaire thermique photovoltaïque (PV / T) avec nanofluide comme moyen de refroidissement. [Bakhti et Saim \(2021\)](#)

- ✓ Dans ce chapitre nous avons parlé du refroidissement et mentionné ses types, Ensuite, nous avons parlé de l'une des techniques d'amélioration du refroidissement qui s'appuie sur les nanofluides. Il est probable qu'elle se généralisera dans le monde de la technologie en raison de ses avantages et également de ses avantages. Ainsi que les inconvénients des méthodes traditionnelles mentionnés précédemment dans ce chapitre, aussi, nous avons présenté quelques études abordant des sujets liés aux nanofluides.

# **Chapitre II : Modèle Mathématique**

## II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous discuterons de la modélisation des équations liées à notre étude, qui contiendra un ensemble d'équations expliquant le phénomène que nous voulons enseigner, à savoir le refroidissement par le nanofluide, et mentionnerons les propriétés du nanofluide, en donnant les relations qui y sont liées.

## II.2 Les formules mathématique du problème :

La formulation mathématique pour étudier ce phénomène implique la modification des équations de base de la dynamique des fluides et du transfert de chaleur pour tenir compte des propriétés particulières des nanofluides sont donnés comme suit (LABIDI ; 2021).

### *Hypothèses simplificatrices :*

- ✓ Fluide newtonien et incompressible.
- ✓ Ecoulement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.
- ✓ Régime d'écoulement laminaire et permanent.

### II.2.1 Pour un fluide de base (fluide pure) :

#### *Equation de continuité :*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.1})$$

#### *Equation de la conservation de la quantité du mouvement*

- Suivant x :

$$\rho \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.2})$$

- Suivant y :

$$\rho \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.3})$$

*Equation de l'énergie :*

$$\rho c_p \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.4})$$

**II.2.2 Pour un nanofluide :**

*Equation de continuité :*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.5})$$

*Equation de la conservation de la quantité du mouvement*

- **Suivant x :**

$$\rho_{nf} \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.6})$$

- **Suivant y :**

$$\rho_{nf} \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.7})$$

*Equation de l'énergie :*

$$\rho_{nf} c_{p_{nf}} \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda_{nf} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.8})$$

**II.3 Les propriétés de nanofluide :** (Abderrahmane ; 2022)

Les propriétés thermo physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo physiques du nanofluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique  $\varphi$ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.).

### II.3.1 La viscosité dynamique $\mu_{nf}$ :

La viscosité est une propriété de fluide qui décrit la résistance interne d'un fluide à l'écoulement ou à la déformation et constitue l'une des propriétés de fluide les plus importantes à prendre en compte

#### *Modèle de Brink man :*

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par Brink man

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II.9})$$

### II.3.2 La masse volumique $\rho_{nf}$ :

La relation entre la masse volumique d'un nanofluide et ses composants peut être complexe en raison de l'effet des nanoparticules sur les propriétés du fluide de base. Cependant, on peut souvent approximer cette relation en considérant la contribution des nanoparticules à la masse volumique totale du nanofluides.

De manière générale, la masse volumique ( $\rho_{nf}$ ) d'un nanofluide peut être calculée en considérant la masse volumique du liquide de base ( $\rho_f$ ) et la contribution des nanoparticules ( $\rho_{np}$ )

$$\rho_{nf} = (1-\varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (\text{II.10})$$

$\rho_{nf}$  : La masse volumique du nanofluide.

$\rho_f$  : La masse volumique du fluide de base.

$\rho_s$  : La masse volumique des nanoparticules.

$\varphi$  : Concentration de nanoparticules

### II.3.3 Conductivité thermique $\lambda_{nf}$ :

La conductivité thermique est un coefficient qui qualifie la réaction d'un matériau face au transfert thermique. Il définit donc la quantité de chaleur en Watt transmise par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 °C / m ou 1 kelvin

$$\lambda = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2(\lambda_s - \lambda_f)\varphi}{((\lambda_s + 2\lambda_f) + (\lambda_f - \lambda_s)\varphi)} \lambda_f \quad (\text{II.11})$$

$\lambda_{nf}$ : La conductivité thermique du nanofluide.

$\lambda_f$ : La conductivité thermique du fluide de base.

$\lambda_s$ : La conductivité thermique des particules solides.

$\varphi$  : Concentration de nanoparticules

### II.3.4 La chaleur spécifique (Cp) :

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide on utilise le modèle suivant :

**Modèle du Pak et Cho :**

$$Cp_{nf} = (1-\varphi)Cp_f + \varphi Cp_s \quad (\text{II.12})$$

$Cp_{nf}$  : La chaleur spécifique du nanofluide.

$Cp_f$ : La chaleur spécifique du fluide de base.

$Cp_s$  : La chaleur spécifique des nanoparticules.

### II.4 Nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt (Nu) est un paramètre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser le transfert de chaleur dans un fluide en convection. Il représente le rapport entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif le long d'une surface.

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (\text{II.13})$$

$h$  : coefficient de convection

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide

$D$  : Diamètre hydraulique

### II.4.1 Le nombre de Nusselt local ( $Nu(x)$ ) :

C'est une variation locale du nombre de Nusselt. Il est défini à un point spécifique le long de la surface et mesure l'efficacité de la convection par rapport à la conduction à ce point précis.

Dans le cas de nanofluide le nombre de Nusselt  $Nu$  est calculé comme suit :

$$Nu = \frac{\lambda_{nf} hD}{\lambda_f \lambda_{nf}} \quad (II.14)$$

$$\text{Où } h = \frac{Q}{(T_c - T(x))} \quad (II.15)$$

$Q$  : densité de flux ( $W/m^2$ )

### II.4.2 Le nombre de Nusselt moyen ( $\overline{Nu}$ ) :

Est une moyenne du nombre de Nusselt sur toute la surface d'intérêt. Il représente une valeur moyenne du rapport entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif sur toute la surface, fournissant une mesure globale du transfert de chaleur par convection.

$$\overline{Nu} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} Nu dx \quad (II.16)$$

- ✓ Dans ce chapitre nous avons donné le modèle mathématique du problème étudié constitué d'équations décrivant le transfert de chaleur, afin de les utiliser ultérieurement dans la résolution du problème, Nous avons ensuite établi des relations qui décrivent les propriétés physiques du nanofluide utilisé, à savoir la viscosité dynamique,  $\mu_{nf}$  la masse volumique  $\rho_{nf}$ , la conductivité thermique  $\lambda_{nf}$ , la chaleur spécifique  $Cp_{nf}$ , et enfin, nous avons établi le nombre de Nusselt  $Nu$  et nombre de Nusselt moyen  $\overline{Nu}$ .

# **Chapitre III : Résultats et discussions**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudierons l'effet de la vitesse d'entrée, de la température du fluide et de différentes valeurs de concentrations de nanoparticules sur le taux de refroidissement de la source de chaleur, que nous supposons dans cette première étude être un composant électronique dans un canal rectangulaire, et dans la seconde étude nous augmenterons un autre composant électronique, l'étude sera réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, et les résultats obtenus seront des champs de vitesse, des champs de température et des courbes décrivant l'effet des variables mentionnées précédemment sur le nombre de Nusselt local et moyen, et enfin nous comparerons les deux études.

### III.2 Présentation du comsol :

Pour simuler notre étude nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics. C'est un logiciel conçu par l'entreprise « Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisée et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL®. COMSOL Multiphysics® comprend l'interface COMSOL Desktop® utilisateur graphique (GUI) et un ensemble d'interfaces d'utilisateur prédéfinies 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 (multiphysiques) 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

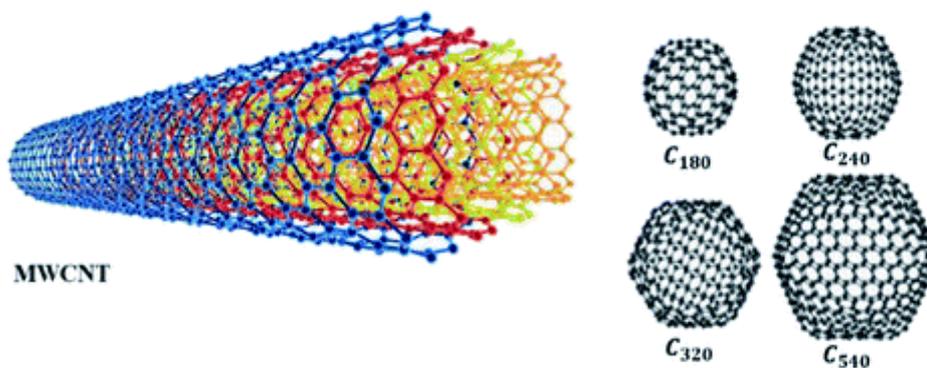
simulations, ces descriptions sont basées sur les lois de la physique. (BOUCHELAGHEM 2017)



**Figure III.1** Logiciel comsol multiphysics

### III.3 Les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) :

Sont de minuscules structures cylindriques composées de plusieurs feuilles de graphène enroulées. Leur utilisation dans le refroidissement des systèmes électroniques repose sur leurs excellentes propriétés thermiques. En raison de leur capacité à conduire la chaleur de manière très efficace, les MWCNT sont intégrés dans des matériaux composites pour améliorer la dissipation de la chaleur des composants électroniques. Cela permet de maintenir des températures de fonctionnement plus basses, ce qui peut prolonger la durée de vie et améliorer les performances des dispositifs électroniques.



**Figure III.2** Nanostructure de MWCNT

III.3 Description du problème :

Nous avons un canal rectangulaire ( $L= 300 \mu m$  ;  $H=100 \mu m$ ) qui contient une source de chaleur (un composant électronique). Nous étudions la performance de refroidissement en utilisant un nanofluide qui passe par le canal par une vitesse uniforme  $U$  et une température froide  $T_f$ . La nanoparticule que nous avons utilisée est le MWCNT (Les nanotubes de carbone à parois multiples).

- ✓ Les résultats sont obtenus par logiciel COMSOL Multiphysics.
- ✓ Nous allons montrer la configuration utilisée dans cette étude qui est illustrée dans la Fig III.3, et les propriétés thermo-physiques de l'eau et nanoparticule utilisé sont présentés dans le tableau Fig III.1.

Tableau III-1 Propriétés thermo-physiques de l'eau et nanoparticule utilisé. (Aissa et al ; 2022)

Propriété	Eau	Nanoparticule (MWCNT)
Conductivité thermique $\lambda$ , (W/m. K)	0.613	2000
Chaleur spécifique $C_p$ , (J/kg. K)	4179	710
Viscosité dynamique $\mu$ , (Pa. s)	0.001	-
Masse volumique $\rho$ , (kg/m <sup>3</sup> )	997	2100

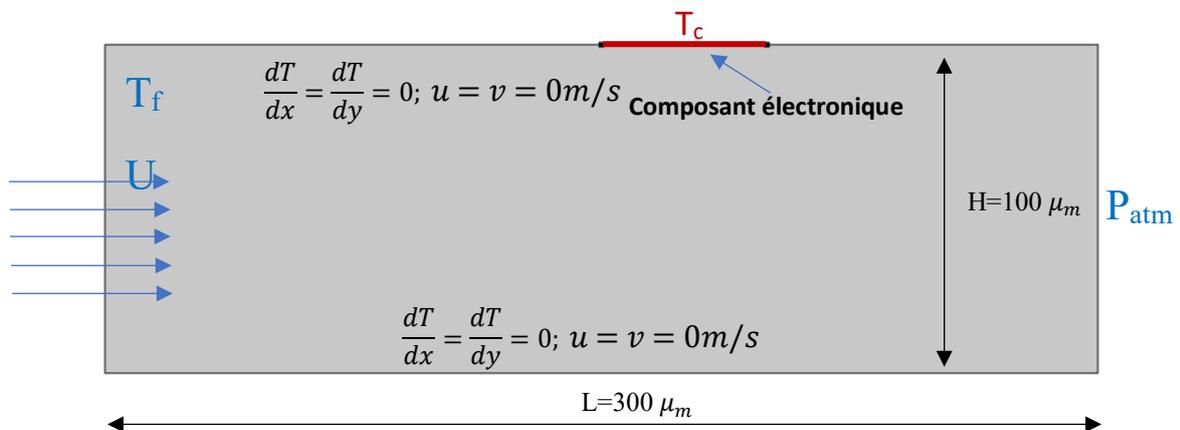


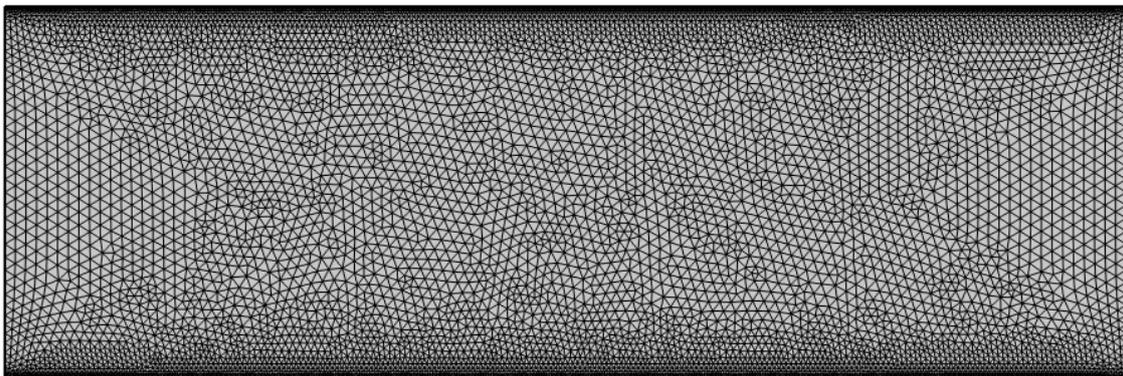
Figure III-3 Domaine de calcul.

**III.5 Indépendance de maillage :**

Dans cette phase, nous nous choisissons le nombre idéal de nœuds qui donne les meilleurs résultats avec le moins de temps de calcul, en utilisant plusieurs maillages de calcul et en comparant le nombre de Nusselt moyen dans chaque cas, sachant que nous avons utilisé de l'eau pure. Ci-dessous nous trouvons le tableau et la figure qui montrent les résultats obtenus nombre idéal de nœuds.

**Tableau III-2** Nusselt moyen en utilisant différents maillages (l'eau pure).

Maillage/ Nombre des éléments	$\overline{Nu}$
M1=7808	<b>0.25797</b>
M2=6013	0.26204
<b>M3=14149</b>	<b>0.27302</b>
M4= 33601	0.27302

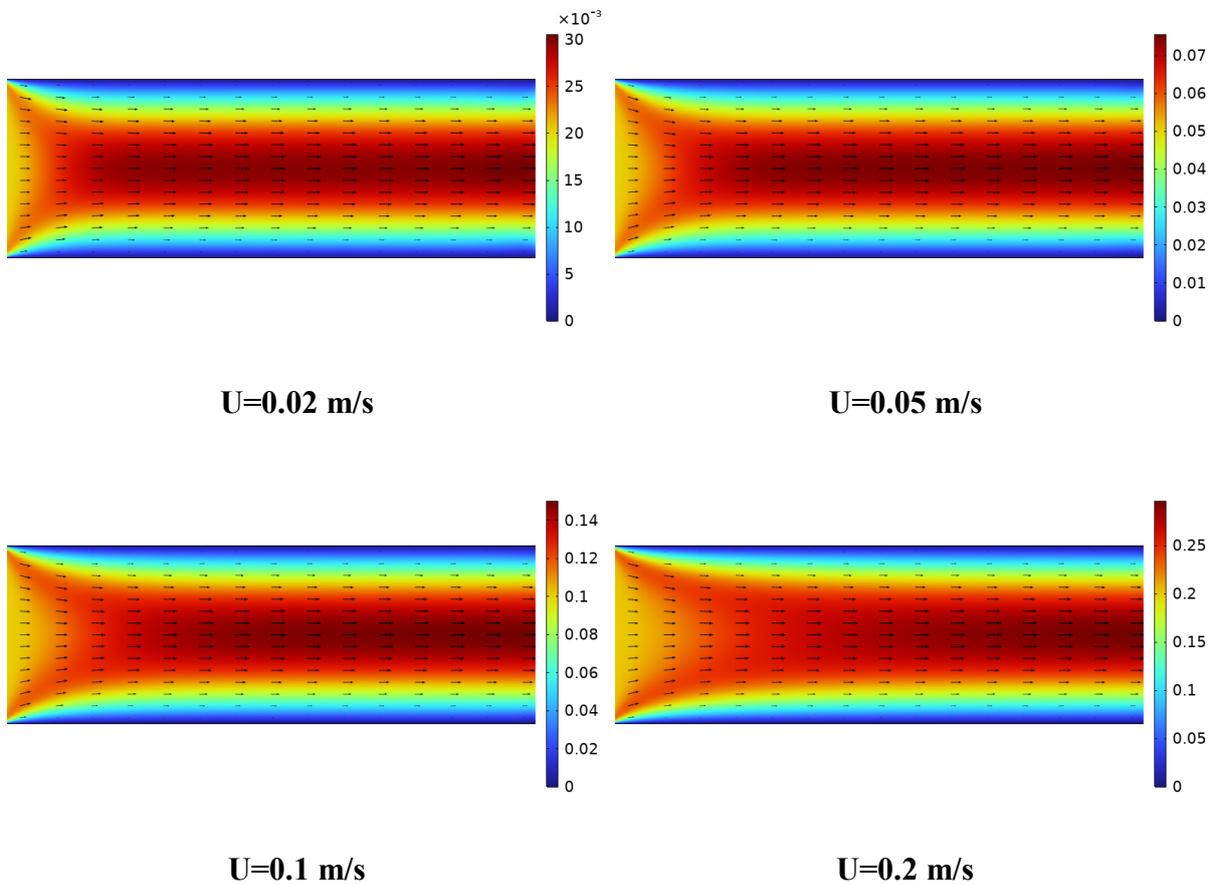
**Figure III.4** Maillage utilisé.

### III.6 Résultats et discussion :

#### 1<sup>er</sup> Cas un seul composant

##### III.6.1 L'effet de la vitesse d'entrée :

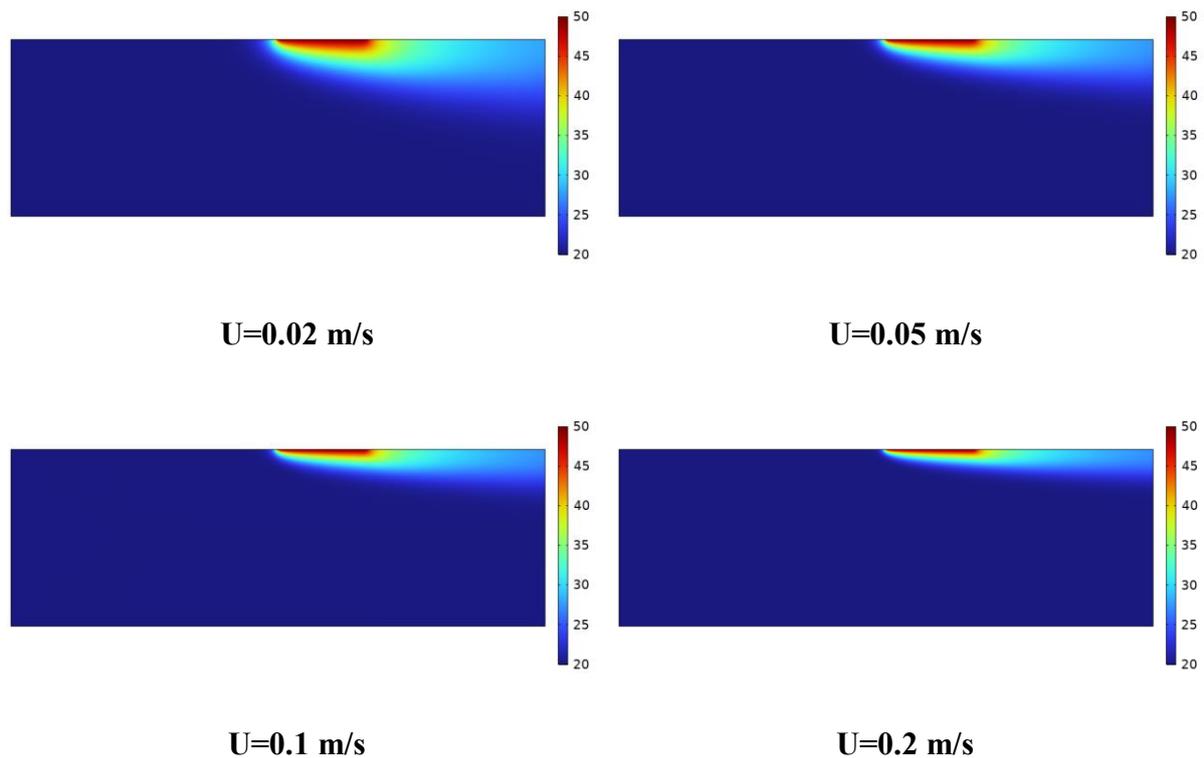
Figure III.5 illustre l'effet de la vitesse d'entrée sur le champ de vitesse en utilisant la même température froide  $T_f$  et sans ajouter nanoparticule (eau pure ;  $\varphi=0$ ). On remarque que plus la valeur de vitesse d'entrée est élevée plus la vitesse maximale est élevée, et grâce au dessin nous voyons que la vitesse augmente dans la direction du milieu du flux.



**Figure :** champs de vitesse en utilisant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20$  °C et  $\varphi=0$ )

### III.6.2 L'effet de la vitesse d'entrée sur le champ de température :

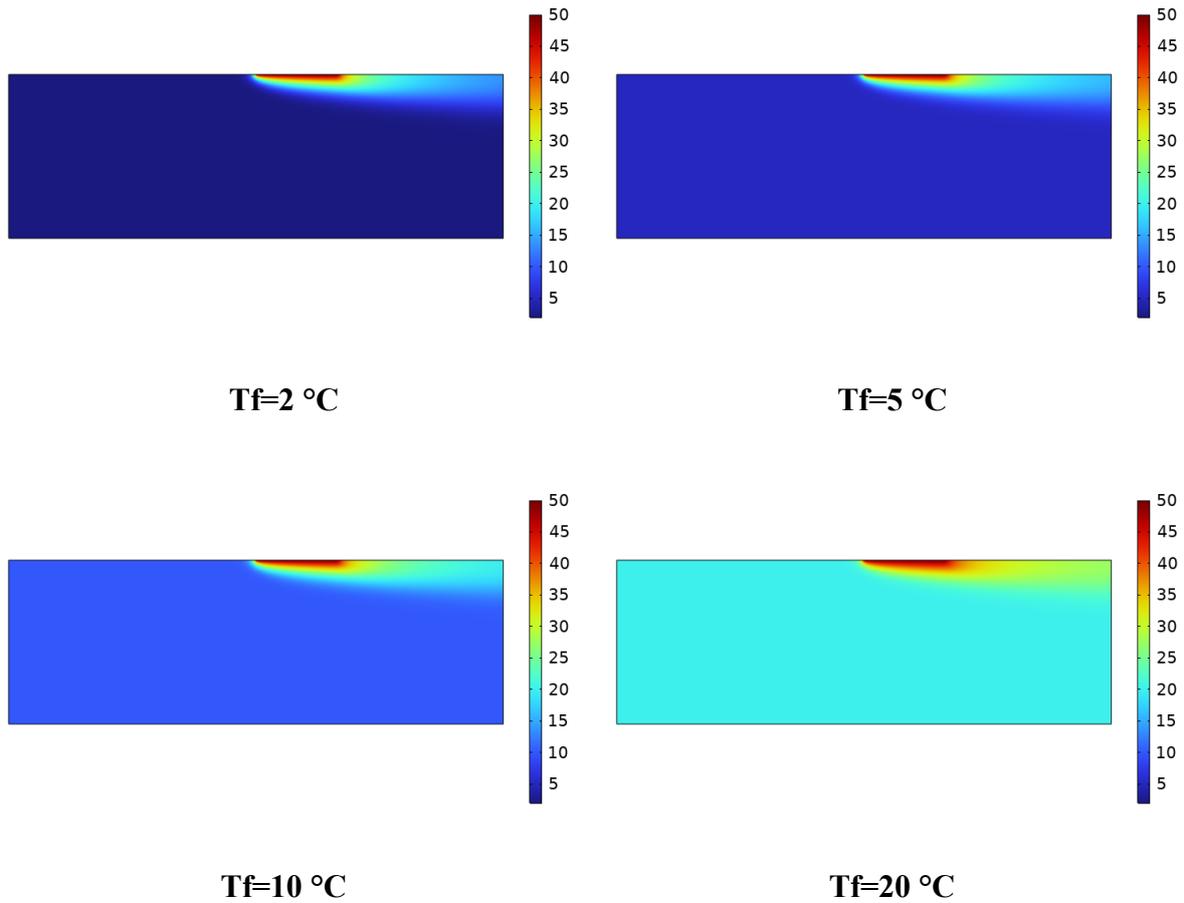
Figure III.6 présente l'effet du changement de vitesse d'entrée sur le champ de température en gardant la température froide constante ( $T_f=20\text{ °C}$ ) et la concentration ( $\varphi=0$ ). Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse aide à refroidir la source de chaleur (composant électronique). Nous voyons que la chaleur se dirige vers la sortie, nous concluons donc que l'augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide a un effet positif sur le processus de refroidissement.



**Figure III.6** champs de température en utilisant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20\text{ °C}$  et  $\varphi=0$ )

### III.6.3 L'effet de la température froide $T_f$ sur le champ de température :

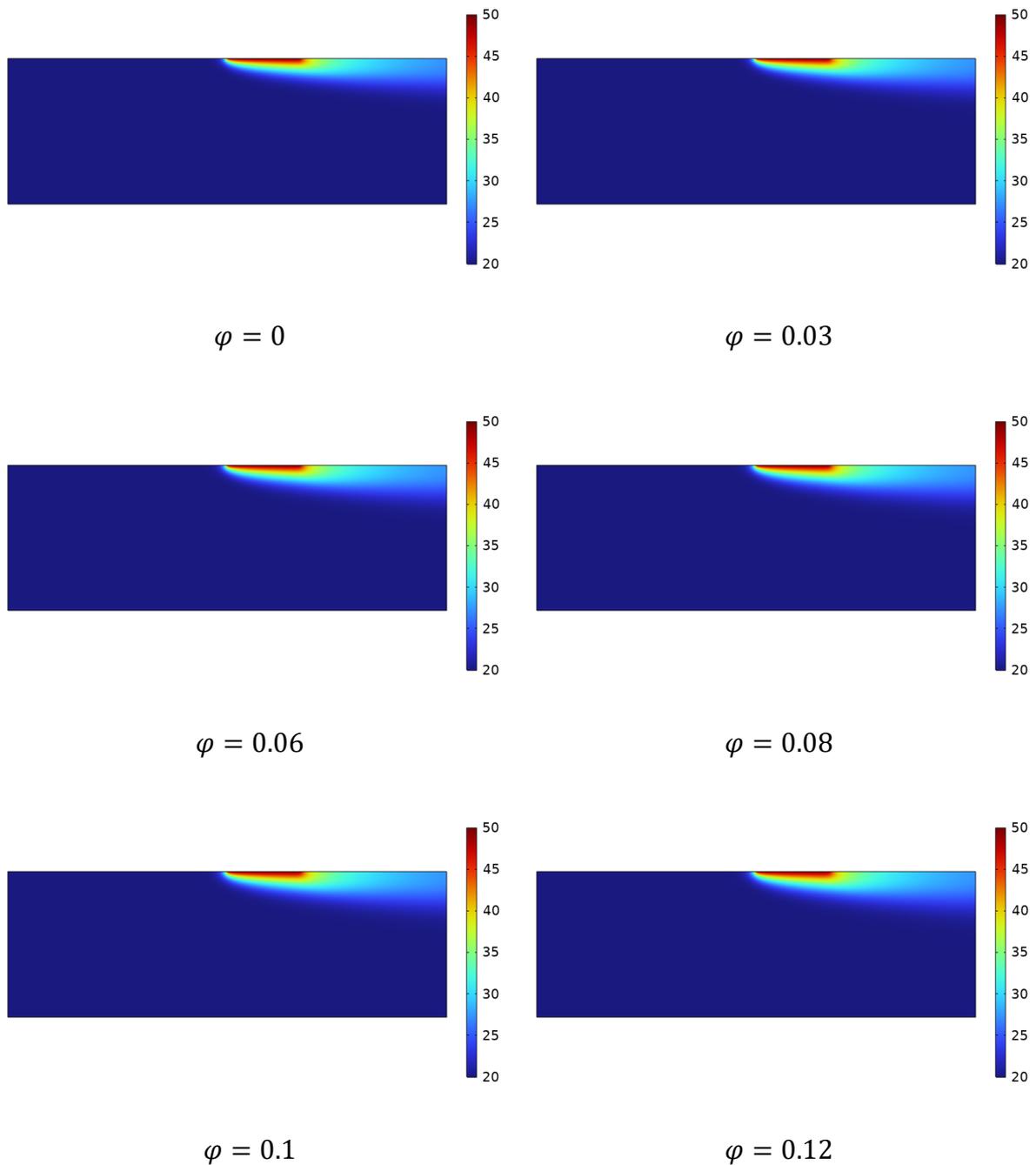
Figure III.7 présente l'effet du changement de température sur le champ de température en gardant constantes la vitesse ( $U=0.1\text{ m/s}$ ) et la concentration ( $\varphi=0$ ). La figure ci-dessous montrera que La diminution de la température froide se traduira par une amélioration du taux de refroidissement, et ainsi nous concluons que la diminution de la température froide entrant dans la forme étudiée a un effet positif sur le refroidissement du composant électronique.



**Figure III.7** champs de température en utilisant différentes températures froides ( $U=0.1\text{ m/s}$  et  $\varphi=0$ )

#### III.6.4 L'effet de concentration $\varphi$ sur le champ de température :

Figure III.8 présente l'effet du changement la concentration  $\varphi$  sur le champ de température en gardant constantes la vitesse ( $U=0.1\text{ m/s}$ ) et la température du froid ( $T_f=20\text{ °C}$ ), et on changera les valeurs de concentration  $\varphi$ , Les résultats de la simulation montrent que l'augmentation de la concentration de nanoparticules augmente Le taux de refroidissement, mais pas autant que l'effet de la modification de la vitesse d'entrée.



**Figure III.8** champs de température en utilisant différentes valeurs de concentration  $\varphi$  ( $T_f=20$  °C et  $U=0.1$  ms/)

### III.6.5 L'effet de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt local :

Figure III.9 représente l'effet de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt, et il paraît clairement dans la courbe ci-dessous plus nous augmentons la vitesse d'entrée plus le nombre de Nusselt est élevé, atteignant la valeur la plus élevée de 100 à la vitesse 0.2 m/s.

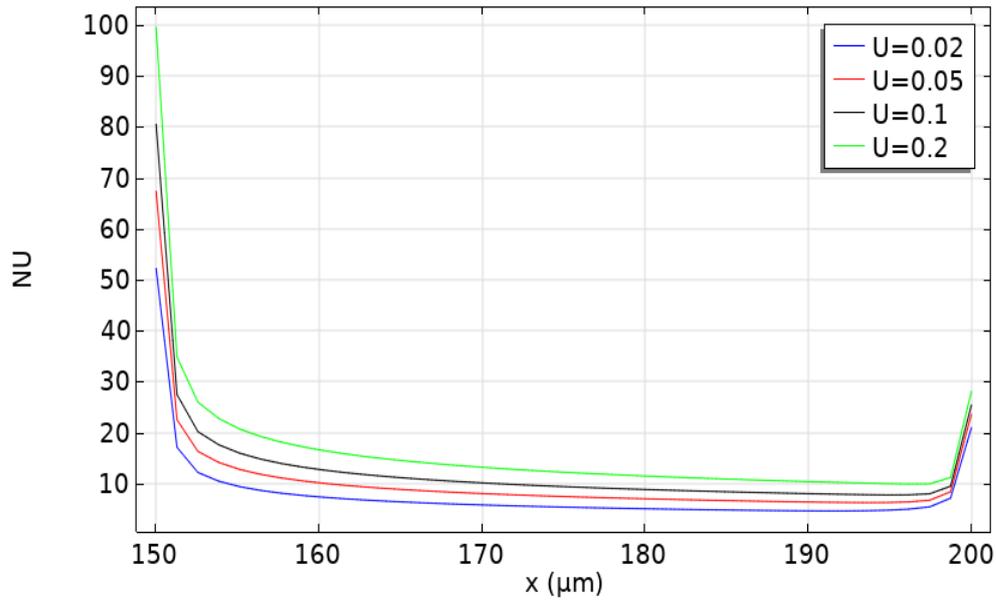


Figure 3.9 Nusselt local en impliquant différentes vitesses d’entrée ( $T_f=20\text{ °C}$  et  $\phi=0$ ).

**III.6.6 L’effet de la température froide sur nombre de Nusselt local :**

Figure III.10 montre l'effet de différentes valeurs de température froide sur le nombre de Nusselt. D'après ce que nous voyons, les valeurs de la température froide n'ont aucun effet sur le nombre de Nusselt, ce qui peut être confirmé mathématiquement car le terme Nusselt n'est pas lié à la température ( $Nu = \alpha Re^a . Pr^b$  ;  $Re = \frac{\rho U.D}{\mu}$  ;  $Pr = \frac{\mu.Cp}{\lambda}$ ),

Cependant, l'abaissement de la température froide affecte le processus de refroidissement, comme nous l'avons vu dans les champs de températures (Figure III.7), Plus la température froide est basse, le refroidissement est mieux.

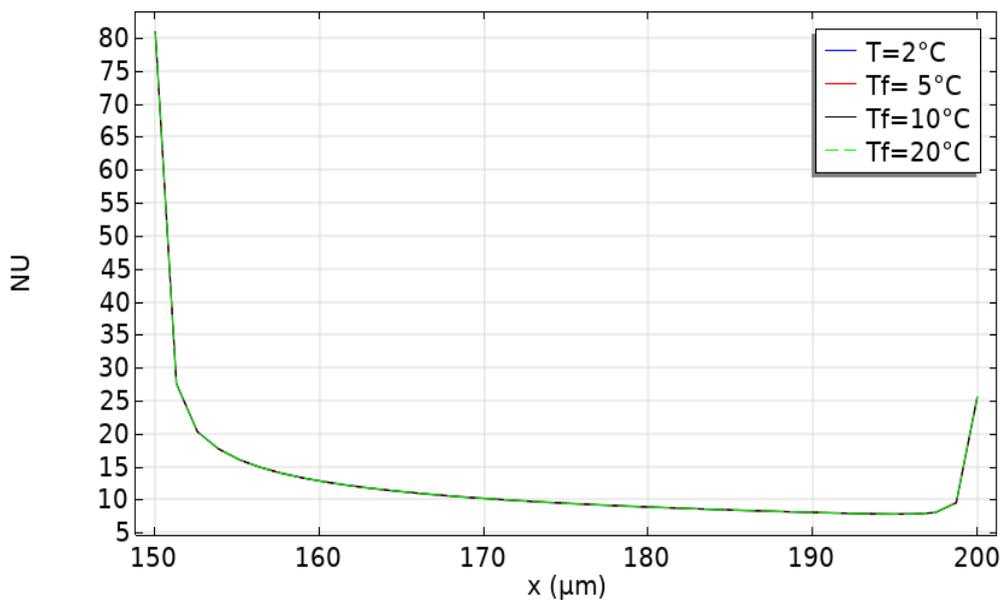
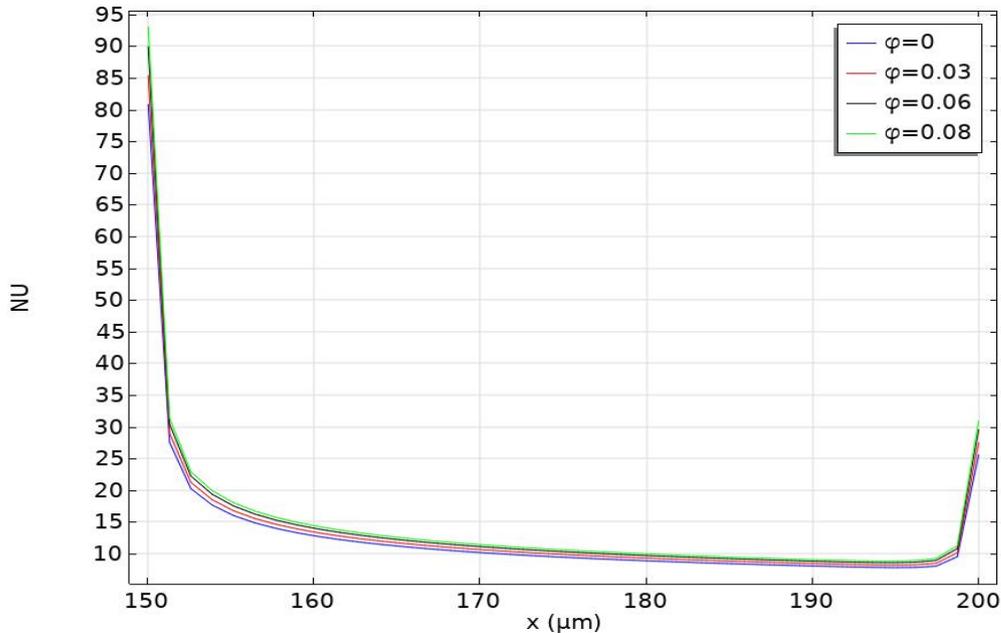


Figure III.10 Nusselt local en impliquant différentes températures froides ( $U=0.1\text{ m/s}$  ;  $\phi=0$ ).

### III.6.7 L'effet de concentration de nanoparticules $\phi$ sur le nombre de Nusselt local :

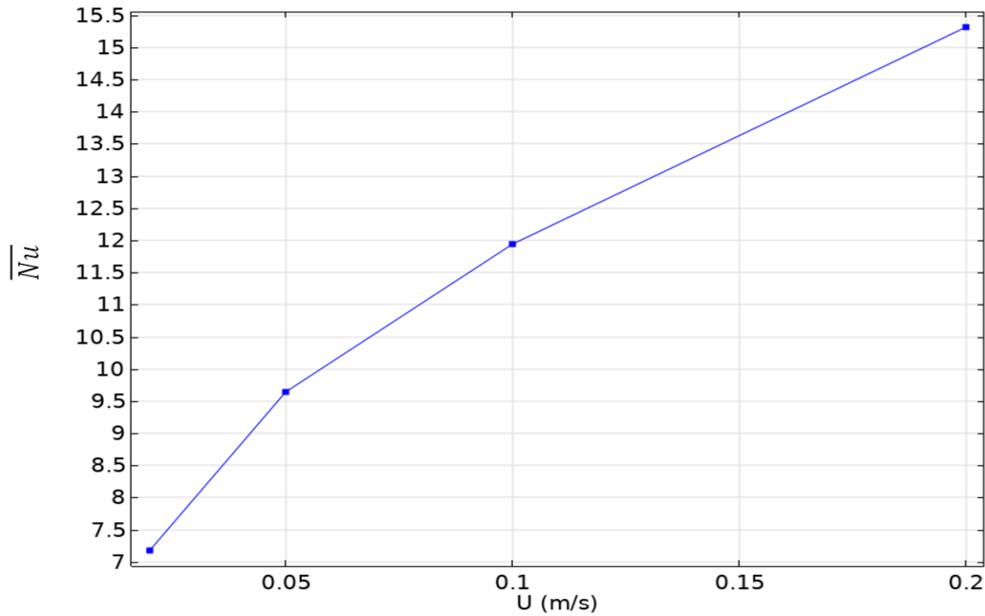
Figure III.11 représente l'effet de la concentration de nanoparticule  $\phi$  sur le nombre de Nusselt, la courbe ci-dessous montre que l'augmentation de la valeur de concentration  $\phi$  affecte positivement sur le nombre de Nusselt.



**Figure III.11** Nusselt local en impliquant différentes concentrations de nanoparticules ( $U=0.1$  m/s et  $T_f=20$  °C).

### III.6.8 L'effet de la vitesse d'entrée sur Nusselt moyen :

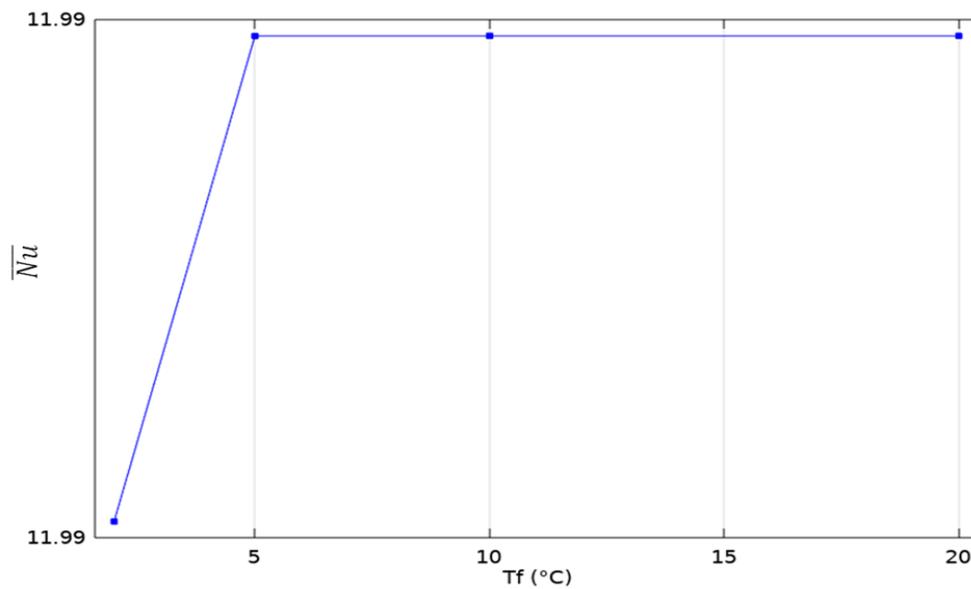
La figure III.12 illustre l'impact de la vitesse sur le nombre moyen de Nusselt, mettant en évidence une augmentation corrélative avec la vitesse, exemple une vitesse de 0.2 le nombre de Nusselt atteint son pic à 15.5, Cette observation conduit à la conclusion que l'augmentation de la vitesse induit un effet positif sur le processus de refroidissement du composant électronique.



**Figure III.12** Nusselt moyen en impliquant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20\text{ °C}$  et  $\phi=0$ ).

### III.6.9 L'effet de la température froide sur nombre de Nusselt moyen :

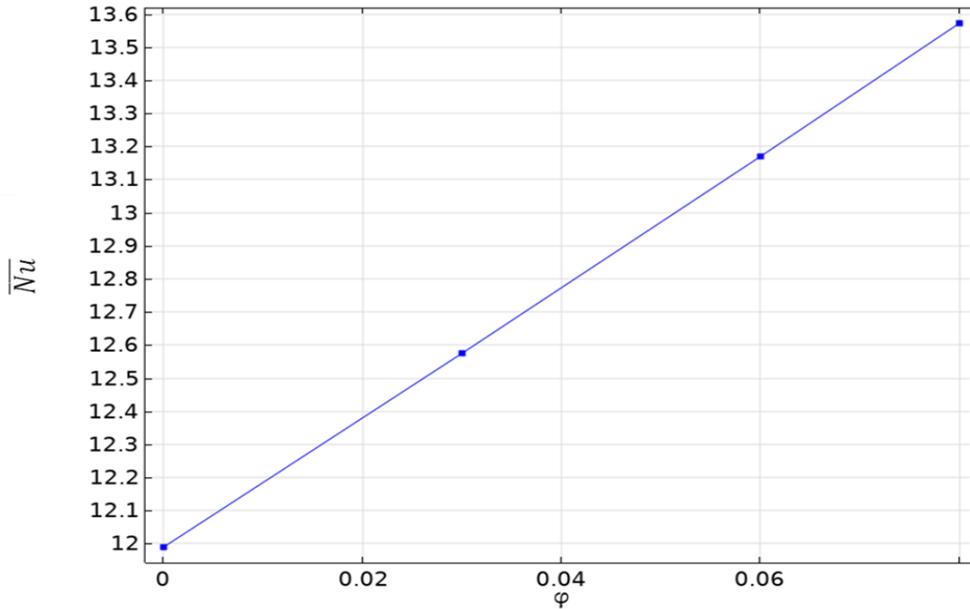
La figure III.13 représente l'effet de la température sur le nombre de Nusselt moyen, à travers la courbe obtenue. On constate que la température n'a pas d'effet sur le nombre de Nusselt moyen, on constate que la valeur du Nusselt moyen reste constante à 11,99 aux différentes valeurs de la température.



**Figure III.13** Nusselt moyen en impliquant différentes températures froides ( $U=0.1\text{ m/s}$  et  $\phi=0$ ).

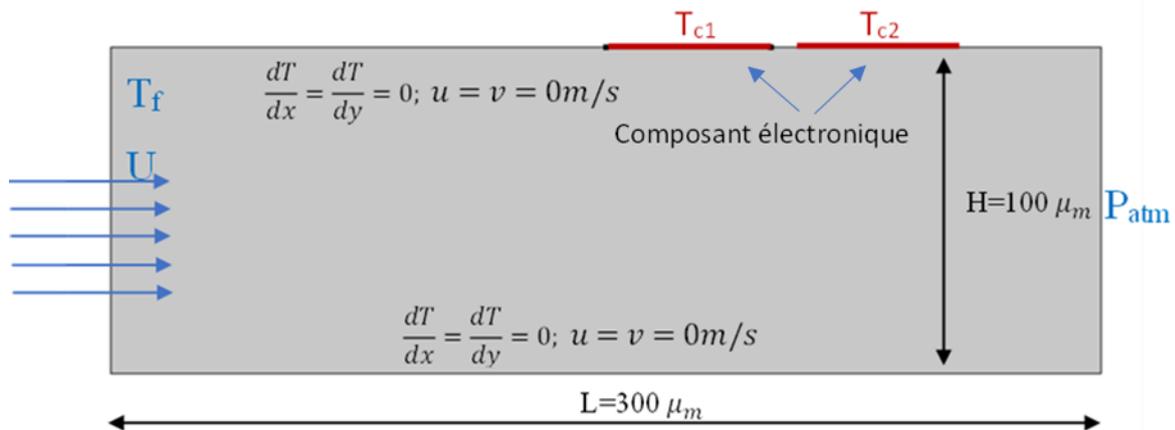
**III.6.10 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen :**

La Figure III.14 présente l'influence de la concentration de nanoparticules sur le nombre moyen de Nusselt. À partir de nos observations, nous constatons une augmentation du nombre moyen de Nusselt jusqu'à son pic à 13.6 pour une concentration de nanoparticules de 8 %. Par conséquent, l'augmentation de la concentration entraîne une amélioration du taux de refroidissement.



**Figure III.14** Nusselt moyen en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules ( $U=0.1$  m/s et  $T_f=20$  °C).

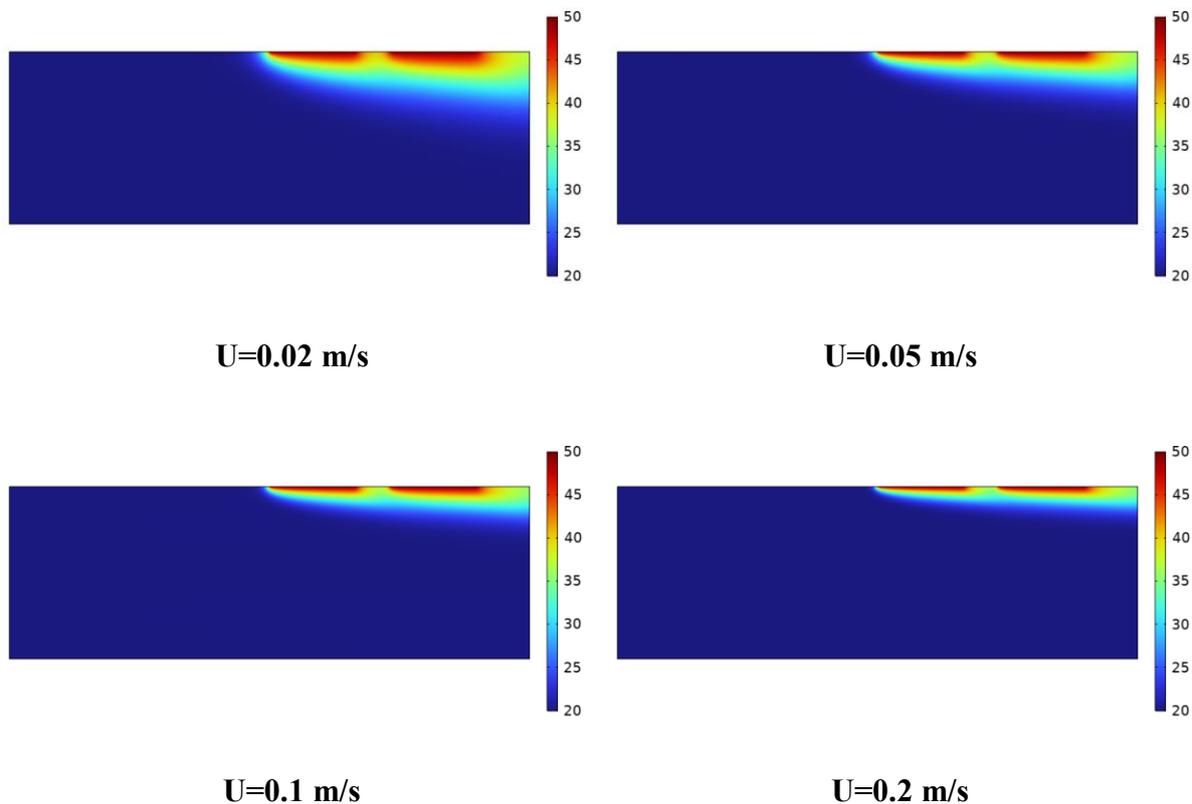
**2<sup>er</sup> Cas : deux composants**



**Figure III.15** Domaine de calcul de deuxième cas.

### III.6.11 L'effet de la vitesse d'entrée sur le champ de température :

Figure III.16 montre l'effet du changement de la vitesse d'entrée sur le champ de température, Dans cette configuration expérimentale, un composant électronique supplémentaire a été introduite, sachant que nous avons fixé la température froide à 20°C et que le taux de concentration des nanoparticules est négligé. La vitesse augmente Le taux de refroidissement, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, la température chaude se dirige vers la sortie, ce qui confirme que la vitesse de refroidissement augmente.

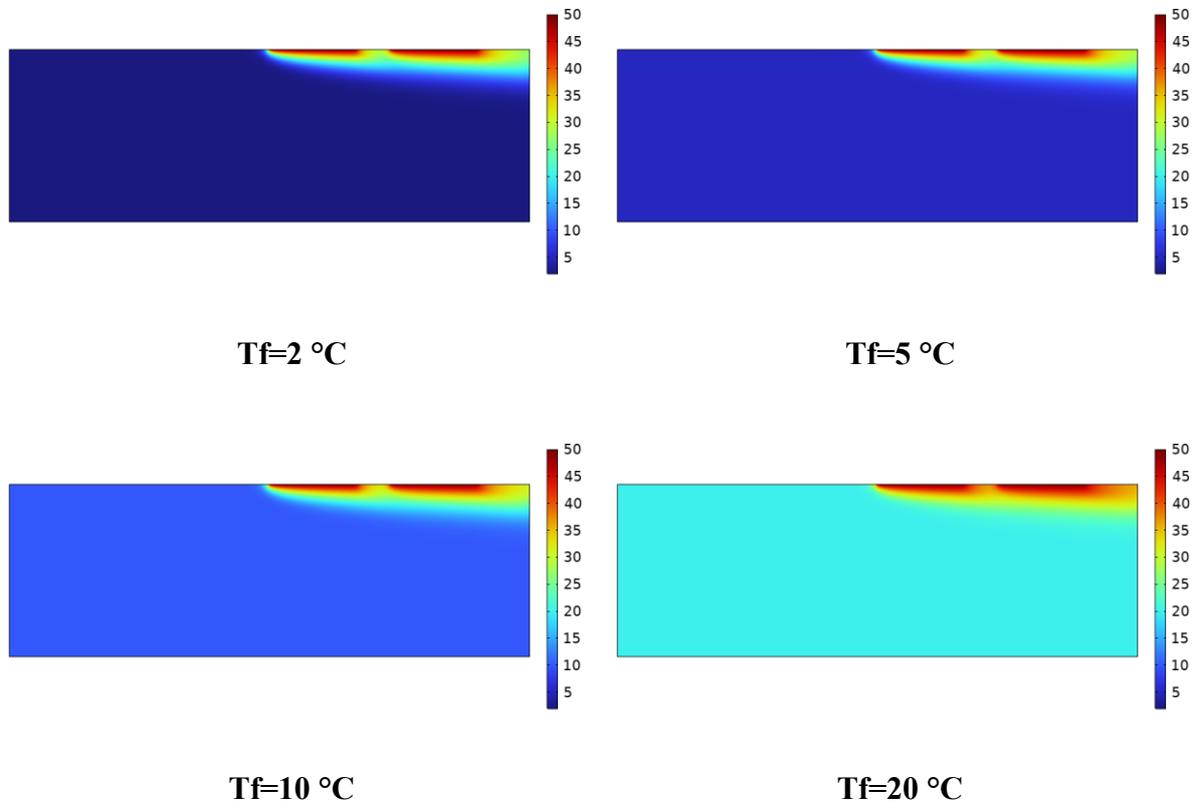


**Figure III.16** champs de température en utilisant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20 \text{ °C}$  et  $\varphi=0$ )

### III.6.12 L'effet de la température froide $T_f$ sur le champ de température :

La Figure III.17 illustre l'impact de la variation de la température froide sur le champ de température alors que la vitesse ( $U=0.1 \text{ m/s}$ ) et la concentration ( $\varphi=0$ ) sont maintenues constantes. L'analyse révèle que la réduction de la température froide conduit à une amélioration de la vitesse de refroidissement. Ainsi, nous pouvons conclure que la diminution de la

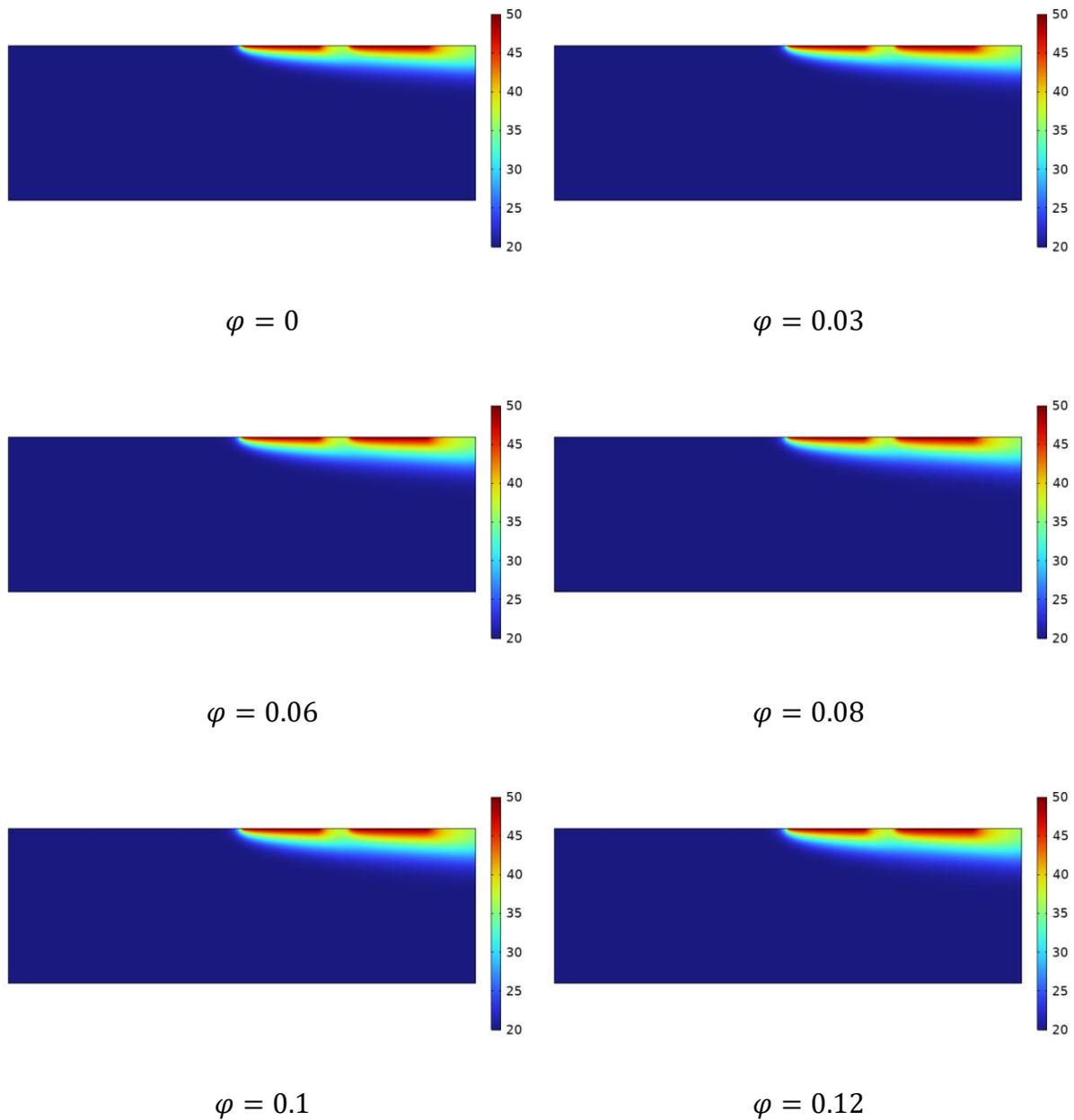
température froide appliquée aux deux composants électroniques étudiés à un effet bénéfique sur leur processus de refroidissement.



**Figure III.17** champs de température en utilisant différentes températures froides ( $U=0.1\text{ m/s}$  et  $\varphi=0$ )

### III.6.13 L'effet de concentration $\varphi$ sur le champ de température :

La figure III.18 montre l'effet d'une augmentation de la concentration de nanoparticules sur le champ de température, la valeur de la vitesse étant fixée à  $0,1\text{ m/s}$  et la valeur de la température froide à  $20\text{ °C}$ , à travers les champs extraits de COMSOL, nous voyons que l'augmentation de la concentration accroît le processus de refroidissement mais pas beaucoup, nous en concluons donc que l'augmentation de la concentration améliore la vitesse de refroidissement mais pas de manière significative.

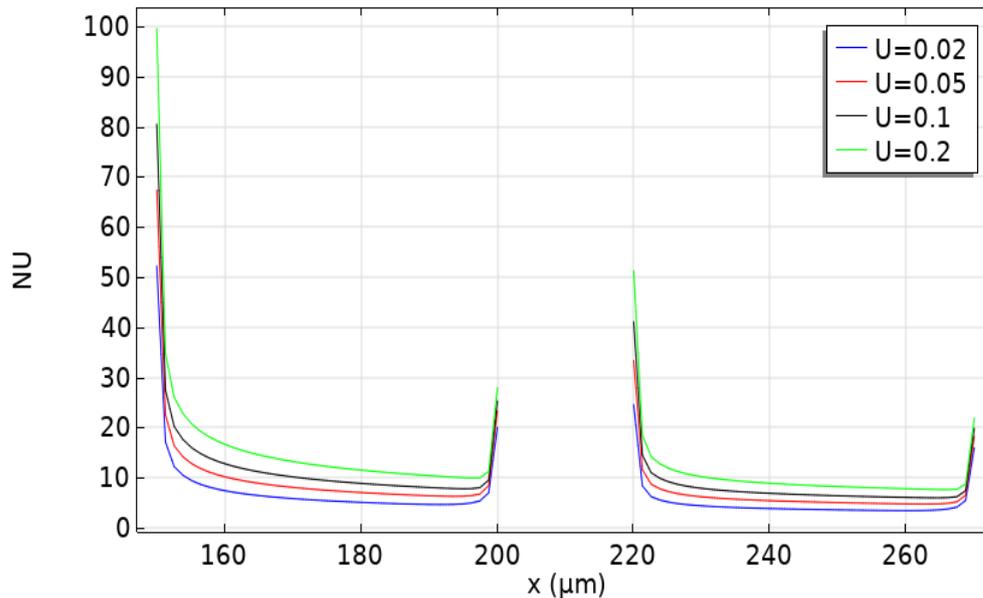


**Figure III.18** champs de température en utilisant différentes valeurs de concentration  $\varphi$ , ( $T_f=20$  °C et  $U=0.1$  ms/)

#### III.6.14 L'effet de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt local :

Figure III.19 illustre l'impact de la vitesse d'entrée sur le nombre de Nusselt local. Dans la représentation ci-dessous, les valeurs de Nusselt sont présentées pour quatre valeurs de vitesse d'entrée distinctes. Deux sources de chaleur (deux composants électroniques) ont été positionnées, et Nous remarquons que le taux de refroidissement s'améliore avec

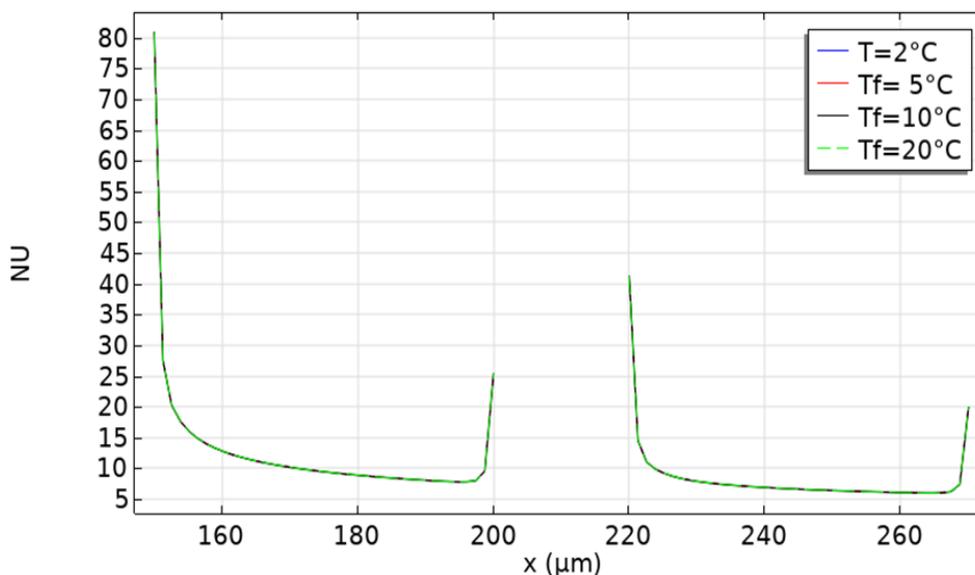
l'accroissement de la vitesse d'entrée, en particulier pour le premier composant électronique, qui atteint une valeur de Nusselt local de 100 à une vitesse de 0,2 m/s.



**Figure III-19** Nusselt local en impliquant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20\text{ °C}$  et  $\varphi=0$ ).

### III.6.15 L'effet de la température froide sur le nombre de Nusselt local :

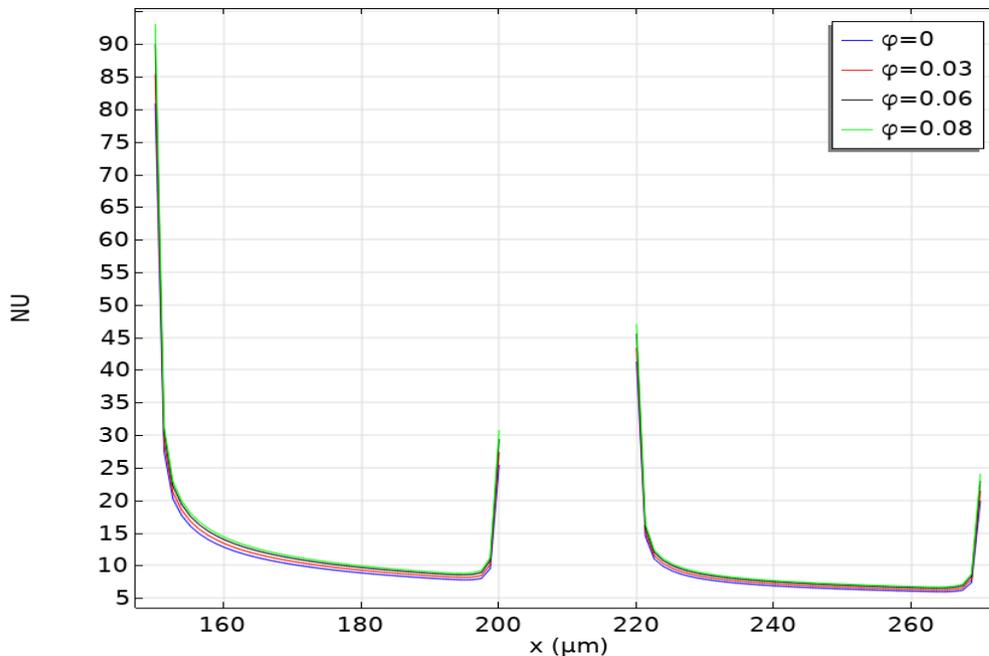
La figure III.20 montre l'effet de la température sur le nombre de Nusselt. En modifiant les valeurs de la température froide, nous observons que la courbe obtenue indique clairement que la température n'a pas d'effet sur la valeur du nombre de Nusselt. Cette observation est confirmée mathématiquement par l'analyse de la figure III.10, qui affirme le fait que le nombre de Nusselt reste constant indépendamment des variations de température froide.



**Figure III.20** Nusselt local en impliquant différentes températures froides ( $U=0.1\text{ m/s}$  ;  $\varphi=0$ ).

### III.6.16 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt local :

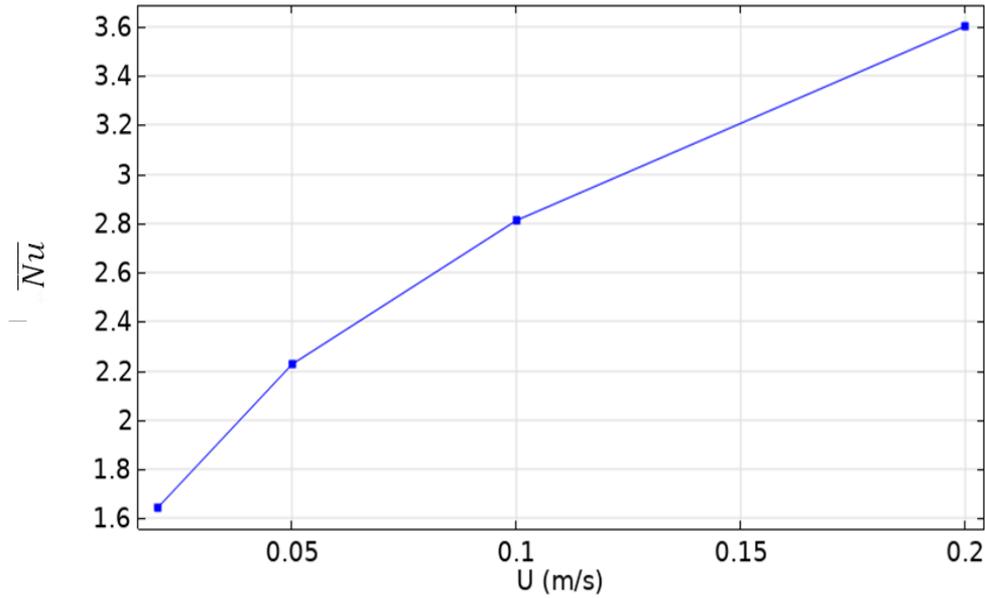
Figure III.21 illustre l'impact de la concentration  $\varphi$  sur le nombre local de Nusselt. Les données représentées dans ce graphique montrent les valeurs de Nusselt pour quatre niveaux différents de concentration  $\varphi$ , appliqués à deux composants électroniques distincts. Une corrélation positive entre l'augmentation de la concentration  $\varphi$  et l'augmentation du nombre de Nusselt est observée. Par exemple, à une valeur donnée de concentration  $\varphi$ , le nombre de Nusselt dépasse 90 pour le premier composant, tandis qu'il atteint environ 45 pour le second.



**Figure III.21** Nusselt local en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules ( $U=0.1$  m/s et  $T_f=20$  °C).

### III.6.17 L'effet de la vitesse d'entrée sur Nusselt moyen :

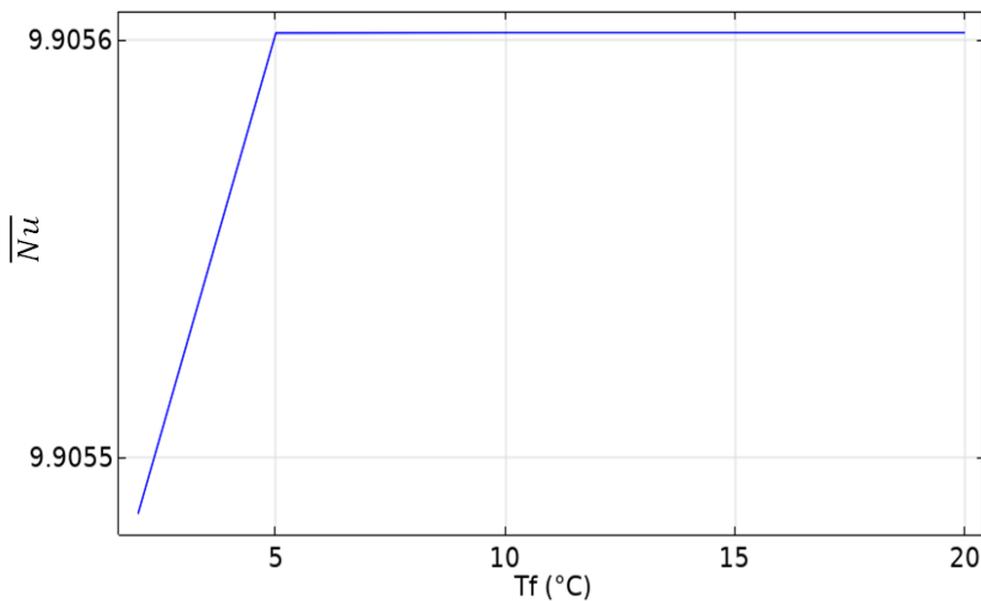
Figure III.22 illustre l'impact de la variation de la vitesse d'entrée  $U$  sur le nombre de Nusselt moyen. L'analyse démontre une relation linéaire positive entre le nombre de Nusselt moyen et l'augmentation de la vitesse  $U$ , avec une valeur maximale de 3,6 atteintes à une vitesse de 0,2 m/s.



**Figure III.22** Nusselt moyen en impliquant différentes vitesses d'entrée ( $T_f=20\text{ °C}$  et  $\phi=0$ ).

### III.6.18 L'effet de la température froide sur le nombre de Nusselt moyen :

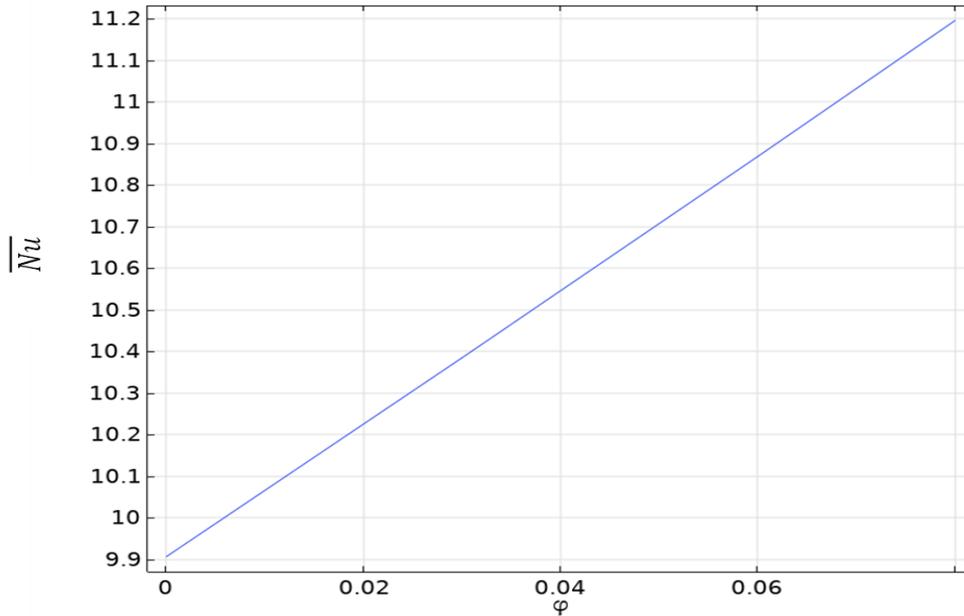
La figure III.23 illustre l'impact de la température froide  $T_f$  sur le nombre de Nusselt moyen. Le graphique indique que la variation de la température froide  $T_f$  n'a pas d'effet significatif sur le nombre de Nusselt moyen, qui reste constant à 9,905.



**Figure III.23** Nusselt moyen en impliquant différentes températures froides ( $U=0.1\text{m/s}$  ;  $\phi=0$ ).

**III.6.19 L'effet de concentration de nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen :**

La Figure III.24 illustre l'effet de la concentration de nanoparticules  $\phi$  sur le nombre moyen de Nusselt. Nos observations indiquent une croissance du nombre moyen de Nusselt jusqu'à son maximum à 11.2 pour une concentration de nanoparticules de 8 %. Ainsi, une augmentation de la concentration  $\phi$  conduit à une amélioration du taux de refroidissement.



**Figure III.24** Nusselt moyen en ajoutant différentes concentrations de nanoparticules  $\phi$  ( $U=0.1$  m/s et  $T_f=20$  °C)

**III.7 Comparaison entre le premier et le deuxième cas :**

La figure III.25 représente une comparaison entre l'effet de la vitesse d'entrée  $U$ , de la température froide  $T_f$  et de la concentration des nanoparticules  $\phi$  sur le nombre de Nusselt dans les deux cas, et à travers ce que nous observons, nous voyons que l'effet sur le nombre de Nusselt est similaire dans les deux cas, sauf que les valeurs de Nusselt les meilleures et les plus élevées sont dans le premier cas parce qu'il y a une seule source de chaleur, et le valeur de Nusselt la plus élevée est dans le premier cas dont la modification de la vitesse et la valeur atteinte 15.5 à 0.2 m/s.

	Cas 1	Cas 2

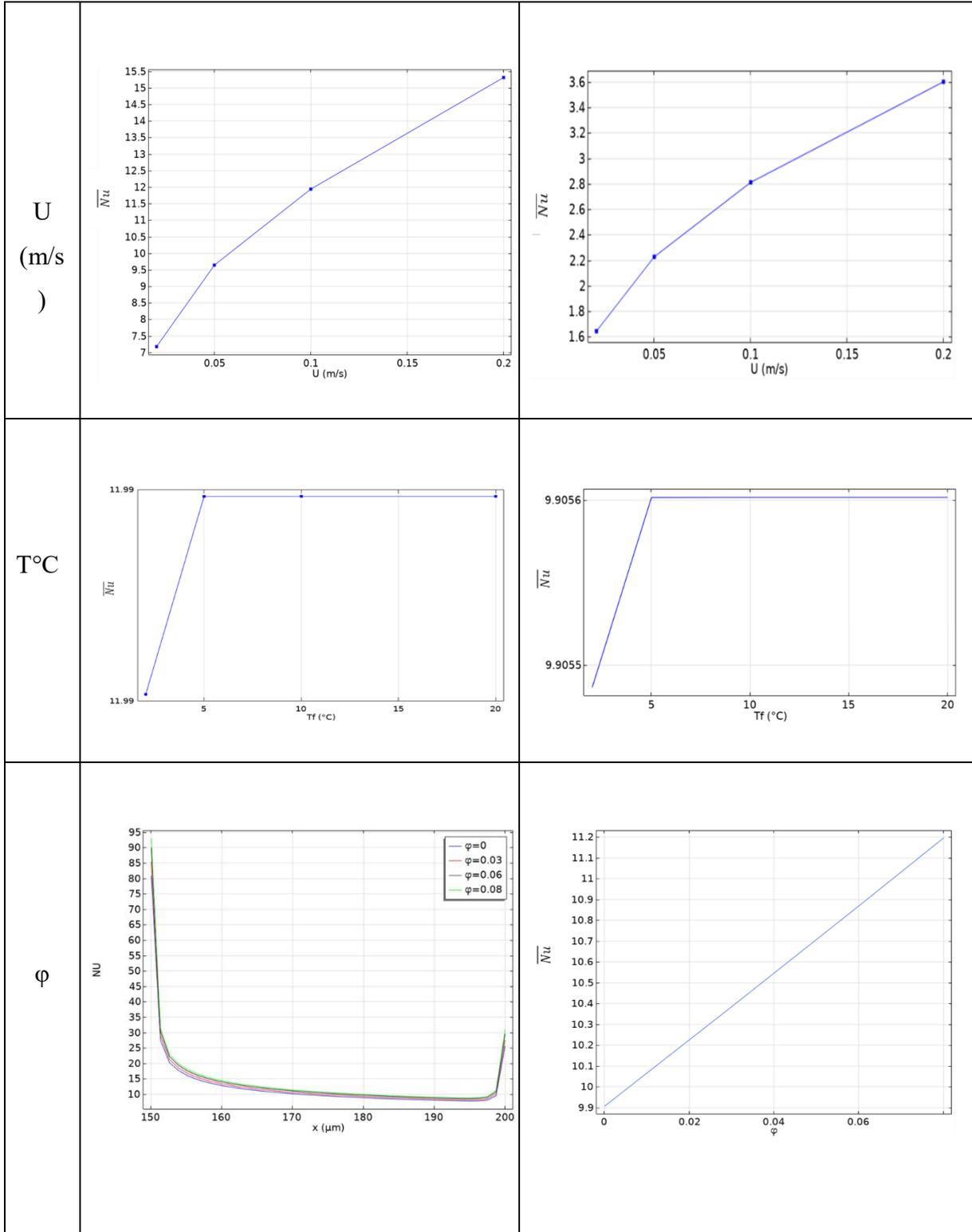


Figure III.25 comparaisons entre la premier et le deuxième cas.

- ✓ Dans ce chapitre, nous avons simulé le processus de refroidissement d'une pièce électronique dans un conduit rectangulaire par un nanofluide, et la nanoparticule que nous avons utilisée est

MWCNT, dans cette étude nous avons changé plusieurs entrées, qui sont la vitesse d'entrée  $U$ , la température froide  $T_f$ , et les concentrations de nanoparticules  $\phi$ , et nous avons fait des figures montrant leur effet sur le refroidissement de la pièce électronique, et ensuite nous avons fait des courbes montrant l'effet sur le nombre de Nusselt local et moyen, puis nous avons fait le même processus dans un deuxième cas, mais avec l'ajout d'une autre pièce électronique pour voir la différence dans le taux de refroidissement, que nous avons présenté dans un tableau comparant les deux (figure III.25), qui nous a montré que le nombre de Nusselt diminuait dans le deuxième cas, et grâce à ce que nous avons étudié, nous avons vu que la augmentation de la vitesse d'entrée avait le plus grand effet sur le nombre de Nusselt et sur le rapport de refroidissement.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Ce travail présente une étude numérique visant à démontrer l'efficacité des fluides nanofluides dans le refroidissement des composants électroniques. L'étude a été réalisée sur un canal contenant des éléments électroniques qui servent de source de chaleur. Le canal est traversé par un liquide de refroidissement à vitesse et température d'entrée constantes.

La simulation a examiné l'effet de la vitesse d'entrée, l'effet de la température d'entrée et les différentes concentrations de nanoparticules dans deux cas différents, le premier avec un seul composant, et le deuxième avec deux éléments.

Après la présentation et la discussion des résultats, les points suivants peuvent être résumés :

- ✓ Le taux de refroidissement des éléments électroniques est meilleur lorsque la vitesse du liquide de refroidissement augmente, mais l'effet de la charge thermique augmente également avec cette vitesse.
- ✓ Le taux de refroidissement augmente lorsque la température du liquide de refroidissement diminue.
- ✓ L'ajout de nanoparticules renforce la conductivité thermique du liquide de refroidissement, où plus la concentration en nanoparticules est élevée, plus le taux de transfert thermique augmente et donc le taux de refroidissement.
- ✓ Plus le nombre d'éléments électroniques augmente, plus le taux de refroidissement diminue.
- ✓ Dans le cas d'un transfert de chaleur par convection forcée, le nombre de Nusselt n'est pas affecté par les variations de température.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

Abderrahmane, A.; Qasem, N.A.A.; Younis, O.; Marzouki, R.; Mourad, A.; Shah, N.A.; Chung, J.D. MHD Hybrid Nanofluid Mixed Convection Heat Transfer and Entropy Generation in a 3-D Triangular Porous Cavity with Zigzag Wall and Rotating Cylinder. *Mathematics* 2022, 10, 769. <https://doi.org/10.3390/math10050769>

Ali Ijam, R. Saidur 2011 Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices), *Applied Thermal Engineering*, Volume 32, January 2012, Pages 76-82

Arbaoui Khayra 2021 -Etude de transfert de chaleur dans un matériau bicouche- universite « dr. tahar moulay » de Saida

BENOSMAN née BABA BEN DERMEL Ihssen et BELGROUM Wahiba 2017 - Ecoulement et transfert thermique dans les canaux avec une rugosité rectangulaire et trapézoïdale - Etude comparative - universite aboubakr belkaid Tlemcen

Benmerabet Mohamed Mehdi 2018 - Modélisation et simulation des phénomènes de transfert thermique par convection assistés par le mouvement fluide. - université- bordj badji mokhtar - annaba-

BOUCHELAGHEM MOHAMED AMINE 2017 - Etude thermique du refroidisseur d'une composante Electronique- Universite Badji Mokhtar annaba

CHADI Kamel (2020) 'Modélisation et simulation du refroidissement des éléments à base de composants électroniques par des nanofluides ' ; Université Mohamed Khider – Biskra

FERRADJI Mouhammed Ali et LAIB Haroune 2023 - Simulation numérique de la convection forcée turbulente dans une conduite rectangulaire munie des ailettes ondulées Appliquer au capteur solaire plan a air - Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila

João-Paulo RIBEIRO, Jean-Antoine GRÜSS « Nanofluides pour les applications thermiques » 10 juil. 2009

LABIDI Adel 2021 Effet des nano-fluides sur la convection forcée dans conduite de section rectangulaire - Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Mohammed BEKHTI et Rachid SAIM - Revue sur les nanofluides et leurs applications dans le domaine de l'énergie solaire - *Journal of Renewable Energies* 24 (2021) 152 – 176 <https://revue.cder.dz/index.php/rer>

## Bibliographie

---

Soufi el habib (2013) Application des NANOFUIDES pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple ; Université KASDI Merbah d'Ouargla

V. Murali Krishna, M. Sandeep Kumar, Numerical analysis of forced convective heat transfer of nanofluids in microchannel for cooling electronic equipment, International Conference on Advanced Materials, Energy & Environmental Sustainability, ICAMEES2018, Proceedings 17 (2019)

Ali Ijam, R. Saidur 2011 Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices), Applied Thermal Engineering, Volume 32, January 2012, Pages 76-82

BENOSMAN née BABA BEN DERMEL Ihssen et BELGROUM Wahiba 2017 - Ecoulement et transfert thermique dans les canaux avec une rugosité rectangulaire et trapézoïdale - Etude comparative - UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAID TLEMCEN

[1] Source:<https://www.tme.eu/fr/news/library-articles/page/53507/les-manieres-de-refroidir-les-appareils-electroniques/>

[2] [https://www.electricity-magnetism.org/fr/4-exemples-de-methodes-de-refroidissement-electrique-les-plus-courantes/#google\\_vignette](https://www.electricity-magnetism.org/fr/4-exemples-de-methodes-de-refroidissement-electrique-les-plus-courantes/#google_vignette)