الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة الميكانيكية
Department of Mechanical Engineering

N° d'ordre : M2 ..... /GM/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Energétique**

Thème

Etude du Refroidissement des Composants Electroniques par un Nanofluide à Travers un Micro Canal

Présenté par :

LATROCHE Feriel

Soutenu le 30 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	RETIEL Noureddine	Professeur	Université de Mostaganem
Examinateurs :	GUERMAT Abdelkader	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Encadrant :	HOUAT Samir	Professeur	Université de Mostaganem

Année universitaire 2025 / 2026

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadrant, ***Pr. HOUAT Samir****, pour son suivi, sa disponibilité, ses orientations et ses précieux conseils qui m'ont beaucoup aidée à la réalisation de ce travail.*

J'adresse également mes profonds remerciements à ***Dr. SAHRAOUI Nassim M.****, pour son soutien et son aide précieuse qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire.*

Je remercie vivement les membres du jury, ***Pr. RETIEL Noureddine*** *et* ***Dr. GUERMAT Abdelkader****, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail, ainsi que pour le temps consacré à son évaluation.*

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique, pour leur accompagnement, leurs enseignements et leurs contributions à ma formation universitaire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon très cher père, qui n'est plus parmi nous, mais dont l'amour, les conseils et les valeurs continuent d'éclairer mon chemin.
Que Dieu lui accorde Sa miséricorde, lui pardonne et l'accueille dans Son vaste paradis.
À ma très chère mère, source de tendresse, de patience et de sacrifices, à celle qui m'a toujours portée par ses prières et son amour.
Que Dieu lui accorde la guérison, la protège et lui donne une longue vie pleine de santé et de bonheur.
À mon cher mari, pour sa présence, sa compréhension, son soutien et ses encouragements dans les moments de fatigue et de doute.
À mes chères sœurs, pour leur amour, leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence précieuse dans ma vie.
À toutes les personnes qui m'ont soutenue et qui ont cru en moi, je dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon affection.

ملخص

لعمل المعروض في هذه الرسالة يتعلق بالتحليل العددي لتبريد المكونات الإلكترونية بواسطة النانوسوائل، التي تتدفق في قناة دقيقة. تشمل هذه التحليل دراسة الهياكل الديناميكية والحرارية للتدفق لمختلف المعلمات الفيزيائية. تُقدَّم دراسة ببليوغرافية حول تبريد المكونات الإلكترونية بواسطة النانوسوائل التي تمر عبر القنوات الدقيقة. يتم أيضًا تقديم وصف للتكوين الفيزيائي المدروس في هذا العمل، مصحوبًا بالصيغ الرياضية وظروف الحدود المطبقة. يتم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج الحسابFluent ، القائم على طريقة العناصر المحدودة. الأخير، يسمح بحل جميع معادلات النموذج، لا سيما معادلة الاستمرارية ومعادلات كمية الحركة. تُعرض نتائج تحليل الديناميكا الهوائية الحسابية (CFD)للتكوينات المدروسة على شكل خطوط تدفق، خطوط متساوية الحرارة، ملفات درجات الحرارة وملفات السرعات.

يتم إجراء مقارنة بين نتائج السوائل التبريدية، ولا سيما النانوسوائل) ماء(CuO-،)ماء (Al2O3-والسائل الأساسي، لتقييم الأداء.

أظهرت النتائج أن استخدام النانو-سوائل وزيادة سرعة الدخول في القناة الدقيقة يساهمان بشكل مشترك في تحسين النقل الحراري؛ وأن النانو-سائل (Cu-Eau) يوفر أفضل كفاءة حرارية مقارنة بـ.(Al2O3)

الكلمات المفتاحية: التحليل الحراري، تبريد المكونات الإلكترونية، النانوسوائل) ماء(Cuo-،)ماء(AL2O3-، المحاكاة الرقمية بطريقة العناصر المنتهية.

Abstract:

The work presented in this thesis focuses on the numerical analysis of cooling electronic components using nanofluids flowing in a microchannel. This analysis encompasses the study of the dynamic and thermal structures of the flow for different physical parameters. A bibliographic study on the cooling of electronic components by nanofluids flowing through microchannels is presented. The description of the physical configuration studied in this work is also presented, along with the mathematical formulation and the applied boundary conditions. The simulation is carried out using the Fluent calculation code, based on the finite volume method. The latter allows for the resolution of all the equations of the model, particularly the continuity equation and those of momentum. The results of the CFD

analysis for the studied configurations are presented in the form of streamlines, isotherms, temperature profiles, and velocity profiles. The comparison of the results between the cooling fluids, namely the nanofluids (water-CuO), (water-Al2O3), and the base fluid, is carried out to evaluate the performance.
The results showed that the use of nanofluids and the increase in the inlet velocity in the microchannel jointly contribute to improving heat transfer; and that the nanofluid (Cu-Water) offers the best thermal efficiency compared to (Al2O3).

Keywords: thermal analysis, cooling of electronic components, nanofluids (water-CuO), (water-Al2O3), numerical simulation by finite volume.

Résumé :

Le travail exposé dans ce mémoire porte sur l'analyse numérique du refroidissement des composants électroniques par des nanofluides, circulant dans un micro canal. Cette analyse englobe l'étude des structures dynamiques et thermiques de l'écoulement pour différents paramètres physiques. Une étude bibliographique sur le refroidissement des composants électroniques par des nanofluides traversant les microcanaux est présentée. La description de la configuration physique étudiée dans ce travail est aussi présentée, accompagnée de la formulation mathématique et des conditions aux limites appliquées. La simulation est effectuée par le code de calcul Fluent, basé sur la méthode des volumes finis. Ce dernier, permet de résoudre l'ensemble des équations du modèle, notamment l'équation de continuité et celles de la quantité de mouvement. Les résultats de l'analyse CFD pour les configurations étudiées sont présentés sous forme des lignes de courant, des isothermes, des profils de températures et des profils des vitesses. La comparaison des résultats entre les fluides de refroidissement, notamment les nanofluides (eau-Cuo), (Eau-AL2O3) et le fluide de base est effectuée afin d'évaluer les performances.

Les résultats ont montré que l'utilisation de nano-fluides et l'augmentation de la vitesse d'entrée dans le micro canal contribuent de manière combinée à améliorer le transfert thermique ; et que le nano-fluide (Cu-Eau) offre la meilleure efficacité thermique par rapport au (Al2O3.

Mots clés *:* analyse thermique, refroidissement des composants électroniques, nanofluides (eau-Cuo), (Eau-AL2O3), simulation numérique par volume finis.

Table des matières

Nomenclature
Liste des figures
Introduction générale ……..1

Chapitre I : Généralités sur Les nano-fluides et les micro-canaux ……..3
I.1-Les caractéristiques des nano-fluides…… .4
I.2-Les différents types des nano-fluides ……..5
I.3-Les applications des nano-fluides ……..7
I.4-Le refroidissement d'un composant électronique par un nano-fluide ……9
I.5-Les propriétés thermo-physiques des nano-fluides…… .9
I.6-Définition des micro-canaux ……11
I.7-Conclusion……12

Chapitre II : **Etude bibliographique et formulation du problème……13**
II.1-Etude Bibliographique ……13
II.2-Formulation du Problème……17
II.2.1- La configuration géométrique……17
II.2.2- Les équations générales ……18
II.2.3-Hypothèses simplificatrices…… 18
II.2.4- Formulation mathématique du problème ……19
II.2.5-Les conditions aux limites ……20
II.3 Conclusion……20

Chapitre III : Méthode et outils de résolution ……21
III.1 Introduction……22
III.2 Méthodes des volumes finis (MVF)……22
III.3 Description du logiciel Gambit……22
III.4. Le solveur fluent et Les étapes de solveur fluent……25
III.5 Conclusion……33

Chapitre IV : Résultats et Discussions……34
IV.1 Etude de maillage ……35
VI.2 Etude de l'effet de la nature et concentration du Nanofluide……36
VI.3 Etude de l'effet de la vitesse d'entrée……41
VI.4 Comparaison de Nusselt Moyen……43

Conclusion générale……45

Références bibliographiques……47

Nomenclature :

Symbole	Désignation	Unité
Cp	La capacité calorifique	[J/kg.K]
h	Le coefficient de transfert thermique par convection	[W/m^2.K]
k	La conductivité thermique	[W/m.K]
l	La hauteur du canal	[µm]
L	La longueur totale du canal	[µm]
Lc	La longueur caractéristique du canal	[µm]
p	La pression	[Pa]
Tc	La température chaude	[K]
Tf	La température froide	[K]

Symboles Grecs

α	La diffusivité thermique	[m^2/s]
β	Le coefficient de dilatation thermique	[K^{-1}]
ρ	La masse volumique	[kg/m^3]
ϕ	La fraction volumique des nanoparticules	%
ν	La viscosité cinématique	[m^2/s]
µ	La viscosité dynamique	[Pa.s]

Nomenclature des indices

Indice	Désignation
eff	Effective
bf	Fluide de base
np	nanoparticule
nf	nanofluide

Nombres adimensionnels :

- Nu: Nombre de Nusselt
- Pr: Nombre de Prandtl
- Re: Nombre de Renolds

Liste des figures

Figure I.1 : Présentation générale sur les nano-fluides 4
Figure I.2 : Présentation des nano-fluides, vue au microscope électronique 4
Figure I.3 : des nanoparticules présentes sous un microscope d oxyde métallique 6
Figure I.4 : des nanoparticules de (a)TiO_2 et (b)Al_2O_3 6
Figure I.5 : Exemples des applications de nano-fluide dans l'énergie solaire -a-b-c..... 8
Figure I.6 : exemples des micro-canaux 11
Figure II.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire 16
Figure II.2 : Configuration physique du phénomène étudié..... 17
Figure III.1 : Interface de GAMBIT 23
Figure III.2 : Construction de la géométrie 23
Figure III.3 : Génération de maillage 24
Figure III.4 : Incorporation des conditions aux limites 24
Figure III.5 : Exportation du maillage..... 25
Figure III.6 : enregistrement du maillage..... 25
Figure III.7: distingué le domaine de calcule 2ddp 26
Figure III.8 : Importation de la géométrie 26
Figure III.9 : Vérification du maillage 27
Figure III.10 : Vérification les dimensions et les unités 27
Figure III.11 : Vérification la forme de la grille en cliquant 28
Figure III.12 : Choix du solveur 28
Figure III.13 : Choix de modèle laminaire 29
Figure III.14 : Les caractéristiques du matériau..... 29
Figure III.15 : choix des conditions opératoires..... 30
Figure III.16: la température au niveau de la paroi chaude (conditions aux limites)..... 30
Figure III.17 : Choix d'ordre d'équation..... 31
Figure III.18 : initialisation de calcul 31
Figure III.19 : Choix des critères de convergence 31
Figure III.20 : Choix du nombre des itérations 32
Figure III.21: Allures de l'évolution des résidus de calcul pour maillage 100x400..... 32
Figure IV.1: Profils de températures à x= 0.5L pour différents maillages 35
Figure IV.2 : Profils de vitesse Ux en (m/s) à x= 0.5L pour différents maillages 35
Figure IV.3 : Les isothermes pour différents maillages..... 36
Figure IV.4 : Les lignes de courants pour différents maillages..... 36
Figure IV.5 : Les isothermes pour différentes concentrations à U = 0.2 m/s..... 36
Figure IV.6 Les lignes de courant pour différentes concentrations à U = 0.2 m/s 36
Figure V.7 : Profils de températures à x= 0.5L pour différentes concentrations
à U =0.2m/s 37
Figure IV.8 : Profils de températures à y= 0.5H pour différentes concentrations
à U = 0.2 m/s..... 37
Figure IV.9 : Profils de vitesses Ux à x= 0.5L pour différentes concentrations
à U = 0.2 m/s..... ..37
Figure IV.10 : Profils de vitesses Uy en m/s à y= 0.5H pour différentes concentrations
de CuO à U = 0.2 m/s..... 38
Figure IV.11 : Les isothermes pour différentes concentrations à U = 0.2 m/s..... 39

Figure IV.12 : Les lignes de courant pour différentes concentrations à U = 0.2 m/s……39
Figure IV.13 : Profils de températures à x= 0.5L pour différentes concentrations de à U = 0.2 m/s
……..... 39
Figure IV.14 : Profils de températures à y= 0.5H pour différentes concentrations à
U = 0.2m/s……..…….....40
Figure IV.15 : Profils de vitesses Ux en m/s à x= 0.5L pour différentes concentrations
à U = 0.2 m/s……..……40
Figure IV.16 : Profils de vitesses Uy à y= 0.5H pour différentes concentrations
à U = 0.2 m/s……..……...41
Figure IV.17: Les isothermes pour différentes vitesses d'entrée en (m/s) ……..……42
Figure IV.18 : Les lignes de courant pour différentes vitesses d'entrée à $\varphi = 2\%$..... ...42
Figure IV.19 : Profils de température à x=0.5L pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$…….42
Figure IV.20 : Profils de température à y=0.5H pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$……43
Figure IV.21 : Profils vitesses Ux (m/s) à x=0.5L pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$……43
Figure IV.22 : Profils vitesses Uy à y=0.5H pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$.....43
Figure IV.23 :Nombres de Nusselt moyen en fonction de la vitesse d'entrée pour différents
types de fluides (Eau, CuO, Al_2O_3)……...43

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le domaine de l'électronique, le refroidissement des composants est devenu un enjeu majeur. En effet, les composants électroniques deviennent de plus en plus petits, plus puissants et plus intégrés, ce qui entraîne une augmentation importante de la chaleur produite. Une température élevée peut réduire les performances des composants, diminuer leur durée de vie et provoquer leur défaillance. Il est donc nécessaire de développer des techniques de refroidissement plus efficaces et plus fiables.

L'amélioration du transfert de chaleur par convection peut être réalisée par plusieurs méthodes, telles que l'optimisation de la géométrie, l'ajout d'ailettes, l'utilisation de surfaces rugueuses ou encore l'amélioration des propriétés thermiques du fluide de refroidissement. Dans ce contexte, les nanofluides représentent une solution prometteuse. Ils sont constitués de nanoparticules solides dispersées dans un fluide de base, comme l'eau ou l'huile, afin d'augmenter sa conductivité thermique et d'améliorer sa capacité de refroidissement [1-2].

Ces dernières années, les nanofluides ont attiré une grande attention grâce à leur potentiel dans plusieurs applications [3-5], notamment le refroidissement des composants électroniques, des véhicules, des transformateurs, des réacteurs nucléaires et des systèmes solaires. Leur utilisation permet d'améliorer l'évacuation de la chaleur et de maintenir les températures dans des limites acceptables. Ainsi, ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude du transfert de chaleur appliqué au refroidissement des composants électroniques par nanofluides.

L'objectif principal est de mettre en évidence l'intérêt de ces fluides avancés dans l'amélioration des performances thermiques et dans l'augmentation de la fiabilité des systèmes électroniques. Notre contribution est concentré sur l'analyse de l'effet des paramètres, tels que la variation de la fraction volumique solide (1% ; 2% ; 3%) , le type des nanoparticules (H_2O-Cu et H_2O-Al_2O_3).

Le mémoire se présente en quatre chapitres : une généralité sur les nano fluides et les micros canaux est présenté dans le premier chapitre, suivi d'une étude bibliographique et la présentation de la formulation du problème traité. L'outils d'analyse et les résultats avec discussions sont présentés respectivement au troisième et quatrième chapitre et en fin une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur Les nano-fluides et les micro-canaux

I-1 Les caractéristiques des nano-fluides :

Durant ces dernières années, le développement des nanotechnologies constitue un chalenge pour les scientifiques où les nano-fluides ont des propriétés qui sont utiles dans des nombreuses applications en générale et dans le transfert thermique en particulier.

La définition d'un nano-fluide est un fluide contenant des nanoparticules (de 1 à 100 nanomètres) ajoutées à un liquide de base comme l'eau, l'huile ou bien l'éthylène glycol. L'intérêt principal des nano-fluides réside dans leurs propriétés physico-chimiques améliorées par rapport aux fluides de base.

Au cours des dernières décennies, les nanofluides sont principalement préparés par la méthode en deux étapes [1] comme montré dans la Figure I.1.

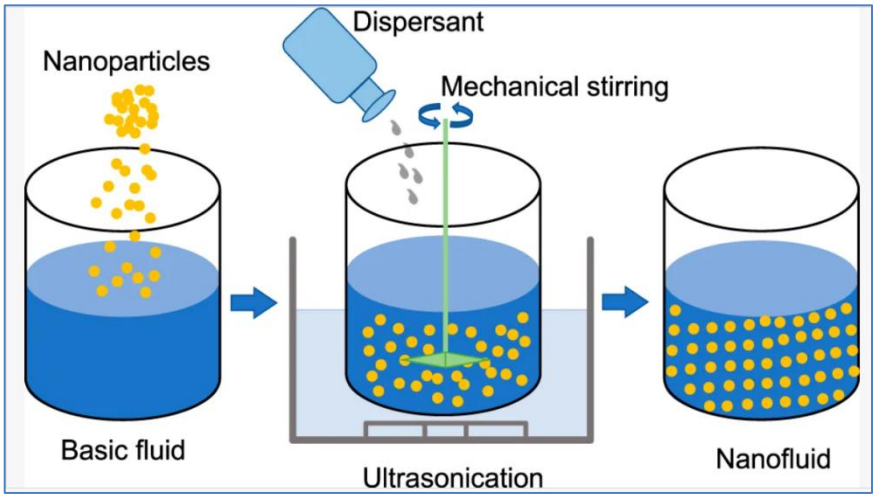


Figure I.1 : *Présentation générale sur les nano-fluides* [1].

Les structures microscopiques des nanofluides peuvent être remarquées dans les quelques images d'exemples [2] présentés dans la figure I.2.

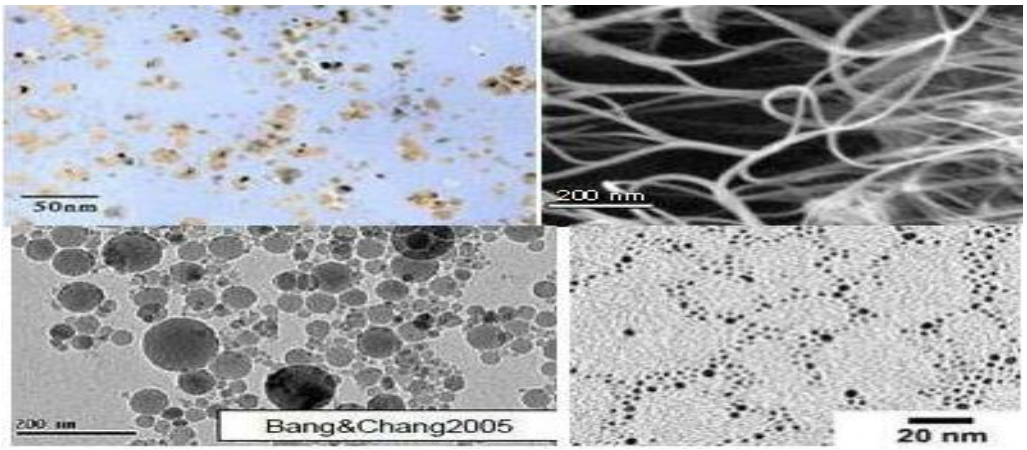


Figure I.2 : *Présentation des nano-fluides, vue au microscope électronique* [2].

L'ajout de ces nanoparticules peut significativement modifier des caractéristiques telles que [4-5]:

- ***La conductivité thermique*** *: c'est* l'une des propriétés les plus étudiées et souvent les plus fiables, car l'ajout de nanoparticules hautement conductrices peut augmenter considérablement la conductivité thermique du fluide de base c'est pour ça les nano-fluides peuvent transférer la chaleur et l'absorber plus efficacement que les fluides conventionnels.
- ***La viscosité*** : généralement, l'ajout des nanoparticules tend à augmenter la viscosité du fluide. L'ampleur de cette augmentation dépend de la concentration, de la taille, de la forme des nanoparticules et des interactions entre elles et avec le fluide de base.
- ***La chaleur spécifique*** : l'effet sur la chaleur spécifique est moins systématique et dépend des propriétés spécifiques des nanoparticules et du fluide de base. Elle peut augmenter ou diminuer, mais les changements sont souvent moins importants que pour la conductivité thermique.
- ***La densité*** : la densité du nano-fluide est généralement une moyenne pondérée des densités des nanoparticules et du fluide de base, en fonction de leur fraction volumique.
- ***Le coefficient de dilatation thermique :*** similaire à la densité, il est souvent estimé par une moyenne pondérée.
- ***Les propriétés optiques :*** la présence de nanoparticules peut modifier l'absorption et la diffusion de la lumière par le fluide, ce qui est important pour les applications solaires ou de transfert radiatif.
- ***Les propriétés électriques et magnétiques :*** l'ajout des nanoparticules conductrices ou magnétiques confère des nouvelles propriétés électriques ou magnétiques au nano-fluide.

I-2 les différents types des nano-fluides :

Les nano-fluides peuvent être classés selon différents critères, principalement en fonction de la nature des nanoparticules dispersées et du fluide de base utilisé, donc voilà les principaux types :

A. *Classification selon le type des nanoparticules :*

- Nano-fluides métalliques : ils contiennent des nanoparticules de métaux purs tels que le cuivre (Cu), l'argent (Ag), l'or (Au) ou l'aluminium (Al). Ces nano-fluides sont souvent étudiés pour leur conductivité thermique élevée.

- Nano-fluides d'oxydes métalliques (figure 3 et 4): ils utilisent des nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) présenté dans la figure 4, l'oxyde de cuivre (CuO), l'oxyde de titane (TiO_2) présenté dans la figure 4,ou l'oxyde de zinc (ZnO) . Ils sont populaires en raison de leur stabilité chimique et de leurs propriétés thermiques intéressantes [4-5].

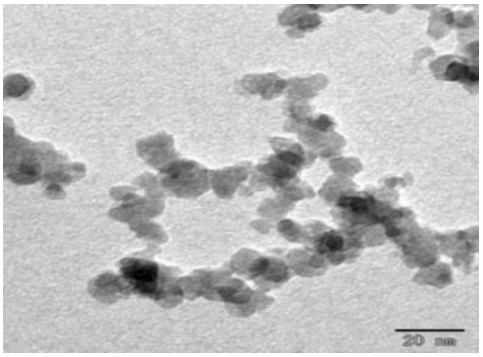


Figure I.3 :*des nanoparticules présentés sous un microscope d'oxyde métallique* [4].

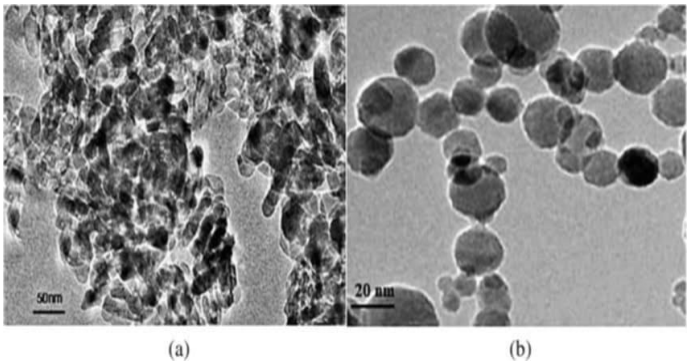


Figure I.4:*des nanoparticules de (a)* ***TiO_2*** *et (b)* ***Al_2O_3*** [5]

- Nano-fluides de carbones : cette catégorie inclut les nano-fluides contenant des nanostructures de carbone telles que les nanotubes de carbone (mono-paroi (SWCNT) ou multi-parois (MWCNT)), les nanofibres de carbone ou les fullerènes. Ils sont reconnus pour leur conductivité thermique et électrique exceptionnelles.
- Nano-fluides de céramiques : ils contiennent des nanoparticules de céramique non-métallique comme le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de d'aluminium (AlN). Ils peuvent offrir une bonne stabilité à haute température.
- Nano-fluides polymère : des nanoparticules polymères sont dispersées dans un fluide de base. Ces nano-fluides peuvent être conçus pour des applications spécifiques comme l'administration de médicaments.
- Nano-fluides hybrides : ils contiennent deux types ou plus de nanoparticules différentes dispersées simultanément dans le fluide de base. L'objectif est souvent de combiner les avantages de chaque type de nanoparticule pour obtenir des propriétés synergiques améliorées. Par exemple, un nano-fluide contenant à la fois des nanotubes de carbone et des nanoparticules métalliques.

B. Classification selon le type de fluide de base : le fluide de base est le liquide dans lequel les nanoparticules sont dispersées. Ses types incluent :

- Nano-fluides à base d'eau : L'eau est un fluide de base courant en raison de sa disponibilité et de son fiable cout.
- Nano-fluides à base d'huile : Différents types d'huile (minérale, synthétique, végétale) sont utilisés, notamment pour des applications à haute température ou de lubrification.
- Nano-fluides à base d'éthylène glycol : Ces fluides sont souvent utilisés dans les systèmes de refroidissement et d'antigel.
- Nano-fluides à base de fluides complexes : il peut s'agir de mélanges de différents liquides (par exemple, eau-glycol) ou de fluides spéciaux comme les fluides ioniques.

Remarque : *le choix du type de nano-fluide dépond fortement de l'application visée et des propriétés spécifiques recherchées. La combinaison des nanoparticules et du fluide de base permet d'adapter les caractéristiques du nano-fluide pour optimiser ses performances.*

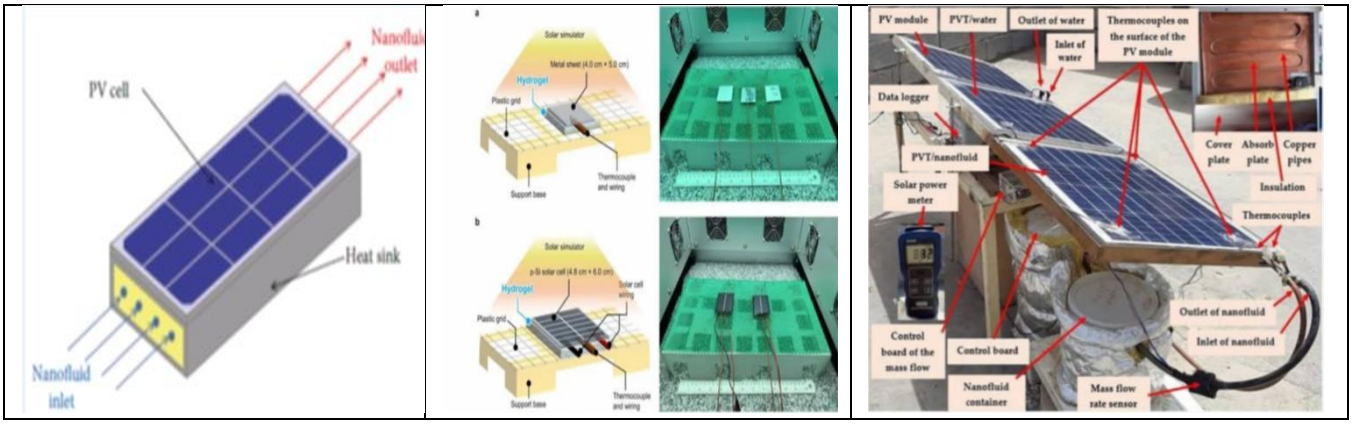
I-3 Les applications des nano-fluides : les nano-fluides sont nécessaires dans divers domaines ce qui signifie une amélioration importante dans le transfert de chaleur. Voici quelques utilisations particulièrement nécessaires :

A-- Refroidissement haute performance :

- **Electronique :** les dispositifs électroniques modernes génèrent une quantité croissante de chaleur. Les nano-fluides sont nécessaires pour refroidir efficacement les microprocesseurs, les cartes graphiques et autres composants afin d'éviter la surchauffe et d'améliorer la fiabilité et les performances.
- **Systèmes militaires et aérospatiaux :** Ces domaines nécessitent des systèmes de refroidissement compacts et légers capables de dissiper de grandes quantités de chaleur dans des conditions extrêmes. Les nano-fluides peuvent offrir des solutions plus efficaces que les fluides de refroidissement conventionnels.
- **Systèmes nucléaires :** Un refroidissement efficace est crucial pour la sécurité et l'efficacité des réacteurs nucléaires. Les nano-fluides pourraient potentiellement améliorer le transfert de chaleur et la sureté de ces systèmes.

B-- Amélioration de l'efficacité énergétique :

- **Echangeurs de chaleurs industrielles :** L'amélioration du transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur utilisés dans diverses industries (chimique, pétrolière, etc.) peut entrainer des économies d'énergie considérables et une réduction des émissions.
- **Collecteurs solaires thermiques** [6]**:** l'utilisation de nano-fluide comme absorbeur solaire peut augmenter l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique (*Figure I-5).*



-a- ***-b-*** ***-c-***

Figure I-5 : *Exemples des applications de nano-fluide dans l'énergie solaire -a-b-c* [6].

- **Systèmes de climatisation et de réfrigération :** L'amélioration du transfert de chaleur dans ces systèmes peut réduire la consommation d'énergie.

C-- Applications biomédicales spécifiques :

- **Thérapies ciblées contre le cancer :** Le transport de médicaments ou l'application d'hyperthermie magnétique à l'aide de nanoparticules dans un fluide ciblé vers les cellules cancéreuses nécessitent des nano-fluides aux propriétés spécifiques.
- **Imagerie médicale avancée :** Les nano-fluides peuvent servir d'agents de contraste améliorés pour l'IRM, permettant une meilleure visualisation des tissus et des organes.

Note importante : Bien que les nano-fluides offrent un potentiel considérable, leur adoption à grande échelle nécessite de surmonter certains défis tels que la stabilité à long terme des suspensions de nanoparticules,

l'augmentation potentielle de la viscosité et de la perte de charge, ainsi que les couts de production. Cependant, dans les applications où la performance et l'efficacité du transfert de chaleur sont critiques, les nano-fluides représentent une solution prometteuse et nécessaire.

I-4 le refroidissement d'un composant électronique par un nano-fluide :

Donc ; plusieurs coins sont touchés par le développement de cette technologie et surtout le domaine de refroidissement des systèmes énergétiques comme par exemple le refroidissement des composants électroniques ce qui nous intéresse dans notre travail.

Cette technologie suit généralement les étapes suivantes [1-2]:

a- L'absorption de chaleur : où le nano-fluide passe à travers des micro-canaux de refroidissement fixés au composant pour absorber la chaleur rapidement grâce à sa conductivité thermique élevée.

b- Transport de chaleur : le fluide chaud et pompé vers un radiateur ou un échangeur de chaleur où les nanoparticules améliorent le transfert thermique et réduisent la résistance thermique du fluide.

c- Dissipation de la chaleur : dans le radiateur, la chaleur est évacuée vers l'air ambiant, ensuite le nano-fluide retourne vers le composant électronique pour recommencer le cycle.

1-5 Les propriétés thermo-physiques des nano-fluides :

Les propriétés thermo-physiques qui caractérisent les nano-fluides sont différents selon la nature des nanoparticules. Ces caractéristiques sont :

- La masse volumique ρ.
- La conductivité thermique K
- Le coefficient d'expansion volumique ß
- La chaleur spécifique Cp
- La viscosité dynamique µ

I-5. a : la masse volumique ρ_{nf}:

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en

fonction de la fraction volumique à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange [1]:

$$\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{n}} = \left(\phi * \rho_{np}\right) + \left(\mathbf{1} - \phi\right) * \rho_{bf} \qquad \text{I.1}$$

- ϕ : la fraction volumique des nanoparticules.
- ρ_{bf}: la masse volumique du fluide de base.
- ρ_{np} : la masse volumique des nanoparticules.

I-5. b : la conductivité thermique :

Il existe plusieurs modèles pour estimer la conductivité thermique effective ($\boldsymbol{k_{eff}}$) des nano-fluides, car elle dépond de nombreux facteurs tels que la taille, la forme et la concentration des nanoparticules, ainsi que des propriétés du fluide de base. L'un des modèles les plus fondamentaux est le modèle de Maxwell pour des particules sphériques à faible concentration [1]:

$$k_{eff} = \mathrm{k_{bf}} \frac{\mathrm{k_{np}} + 2\,\mathrm{k_{bf}} + 2\phi(\mathrm{k_{np}} - \mathrm{k_{bf}})}{\mathrm{k_{np}} + 2\,\mathrm{k_{bf}} - \phi(\mathrm{k_{np}} - \mathrm{k_{bf}})} \qquad \text{I.2}$$

$\mathrm{k_{bf}}$: la conductivité thermique du fluide de base.

- $\mathrm{k_{np}}$: la conductivité thermique des nanoparticules.

I-5.c : La capacité calorifique :

La capacité calorifique (Cp_{nf}) d'un nano-fluide peut être calculée à l'aide de la formule suivante, en supposant l'équilibre thermique entre le fluide de base et les nanoparticules [1]:

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho C_P)_{bf} + \phi(\rho C_P)_{np}}{\rho_{nf}} \qquad \text{I.3}$$

- $C_{P_{bf}}$: la capacité calorifique du fluide de base.
- $C_{P_{np}}$: la capacité calorifique des nanoparticules.

I-5.d : la viscosité dynamique :

La viscosité dynamique effective (μ_{eff}) des nano-fluides est également complexe et dépond de plusieurs facteurs. Un modèle classique pour les suspensions de particules sphériques à faible concentration est l'équation d'Einstein :

$$\mu_{eff} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \qquad \text{I.4}$$

- μ_{bf} : La viscosité dynamique du fluide de base.

Les propriétés thermo-physiques du fluide pur (eau) et celles des nanoparticules (Cu et Al_2O_3) sont données dans le tableau 1 à la température de T=25°C [7].

Tableau 1 : les propriétés thermo-physiques du fluide pur et des nanoparticules [7].

	Eau	**Cu**	**Al_2O_3**
Cp (j/kg.k)	4179	385	765
ρ(kg/m^3)	997.1	8933	3970
K(W/m.k)	0.613	400	40
α (m^2/s)*10^{-7}	1.47	1163.1	131.7
$\beta(k^{-1})$*10^{-5}	21	1.67	0.85

1-6 Définition des micro canaux :

Le terme « micro-canal » désigne des canaux dont le diamètre hydraulique est compris entre 10 et 100 micromètres [8], ce sont des échangeurs de petites surfaces qui mènent à un transfert de grosses puissances thermiques vers un fluide caloporteur. Ils sont constitués d'un dissipateur de chaleur fabriqué d'un solide de grande conductivité thermique tel que le silicium ou le cuivre avec les micro-canaux usinés au sein du solide. Un dissipateur de chaleur à micro-canaux contient généralement un grand nombre de micro-canaux parallèles (figure I.6). Le liquide de refroidissement est forcé à passer à travers ces canaux pour évacuer la chaleur générée dans la surface chaude en contact avec la paroi inférieure du dissipateur.

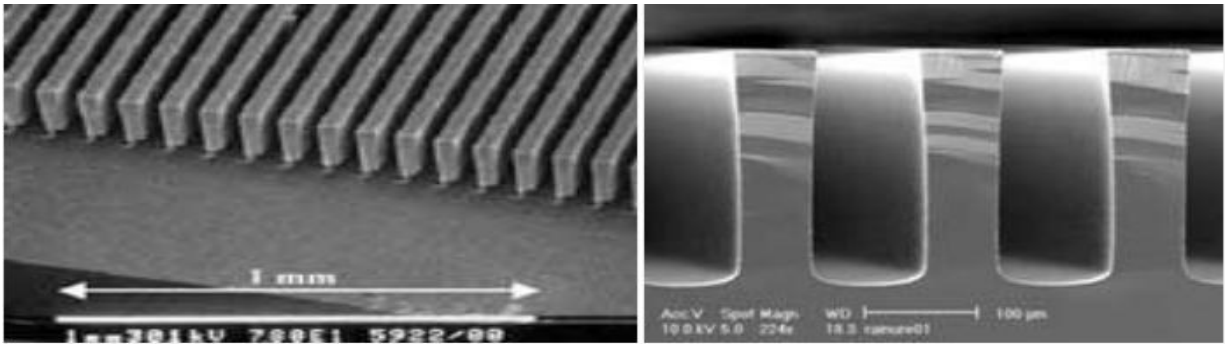


Figure I-6 : exemples des micro-canaux [8]

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales sur les nano-fluides, leurs principales caractéristiques, leurs différents types ainsi que leurs applications dans plusieurs domaines, notamment le refroidissement des composants électroniques. Grâce à leurs propriétés thermo-physiques améliorées, comme la conductivité thermique, la viscosité et la chaleur spécifique, les nano-fluides représentent une solution prometteuse pour améliorer le transfert de chaleur. De plus, l'utilisation des micro-canaux permet d'augmenter l'efficacité du refroidissement en évacuant rapidement la chaleur générée par les composants électroniques. Les notions présentées dans ce chapitre constituent une base théorique importante pour la suite de notre travail. Elles seront exploitées dans les chapitres suivants afin d'analyser l'effet des nano-fluides et des micro-canaux sur l'amélioration du refroidissement des composants électroniques.

Chapitre II :

Etude bibliographique

Et formulation du problème

II-1. Etude bibliographique :

Une étude bibliographique réalisée sur quelques travaux qui traitent l'utilisation des nano fluides dans l'amélioration des transferts de chaleurs dans domaines différents et en particulier dans le refroidissement des composants électroniques

Sohel Murshed et al. [9] ont examiné et analysé les propriétés de transfert de chaleur ainsi que les performances de nouveaux fluides frigorigènes potentiels, tels que les nanofluides possédant des propriétés thermiques supérieures, afin de répondre aux exigences de refroidissement des dispositifs électroniques à haute température. Ils ont également abordé la technologie de refroidissement des dispositifs électroniques utilisant les micro canaux et les nanofluides.

Mangalkar et al.) [10] ont présenté une revue sur l'amélioration du transfert de chaleur en utilisant les nanofluides pour le refroidissement des composants électroniques. L'une de leurs conclusions les plus importantes est que le taux de transfert de chaleur s'améliore avec la conductivité thermique élevée des nanoparticules, ainsi qu'avec le faible diamètre des nanoparticules et l'augmentation de leur concentration dans le fluide de base.

Colangelo et al. [11] ont analysé l'application d'une nouvelle génération de fluides caloporteurs et de nanofluides aux dispositifs électroniques. Ils ont mentionné que les performances thermiques du dissipateur thermique ne dépendent pas uniquement des propriétés des nanofluides, mais aussi de la conception technique. Ils ont également indiqué que les nanoparticules les plus utilisées sont celles d'Al_2O_3, en raison de leurs bonnes propriétés thermo physiques ainsi que de leur faible coût sur le marché. Ils ont aussi évoqué le problème d'obstruction, qui peut représenter un problème important, en particulier pour les nanofluides à forte concentration volumique supérieure à 1,0 %. Ce problème doit être pris en compte, surtout avec le faible volume des micro canaux dans les dissipateurs thermiques. Il est donc nécessaire de revoir la conception thermique des systèmes de refroidissement des équipements électroniques selon la nature et la concentration des nanofluides.

Sharma et al. [12] ont étudié expérimentalement l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur dans des micro canaux. Le matériau utilisé pour le dissipateur thermique à micro canaux est le cuivre, et l'eau a été utilisée comme agent de refroidissement. Ils ont étudié l'évolution des taux de transfert de chaleur, l'effet du facteur de frottement, l'influence de la perte de charge ainsi que l'évolution de la distribution de la

température. Ils ont conclu que le débit massique et le facteur de frottement diminuent lorsque la vitesse d'écoulement du fluide diminue. La perte de charge augmente avec l'augmentation de la vitesse du fluide et du taux d'évacuation de la chaleur. Le taux de transfert de chaleur augmente dans le dissipateur thermique à micro canaux avec l'augmentation du débit massique

Ghasemi et al. [13] ont étudié numériquement l'effet de l'utilisation des nanofluides sur les caractéristiques du transfert de chaleur et de l'écoulement du fluide dans un dissipateur thermique à mini canaux de forme triangulaire. Dans cette étude, ils ont utilisé un nanofluide alumine-eau **(Al_2O_3-H_2O)** comme fluide de refroidissement, avec différentes fractions volumiques. Ils ont conclu que l'utilisation d'un nanofluide comme fluide de refroidissement permet d'améliorer les performances du transfert de chaleur avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Ils ont également conclu que le coefficient de transfert de chaleur et le facteur de frottement augmentent, tandis que la résistance thermique du dissipateur thermique diminue.

Sohel Murshed et al. [14] ont étudié le refroidissement par convection des liquides chargés en nanoparticules dans les systèmes à micro canaux. Ils ont également analysé les résultats de recherche concernant l'application directe de ces nouveaux liquides, appelés nanofluides, aux systèmes de refroidissement des dispositifs électroniques. Parmi leurs résultats, ils ont montré que les nanofluides possèdent une conductivité thermique beaucoup plus élevée que celle des fluides de base conventionnels et qu'ils contribuent à un meilleur refroidissement des dispositifs électroniques modernes. Ils ont également démontré les performances du transfert de chaleur par convection des nanofluides dans les micro canaux, indiquant qu'ils peuvent être utilisés dans des dispositifs miniaturisés, tels que les composants électroniques modernes, afin d'améliorer leur refroidissement.

Behnampour et al. [15] ont étudié numériquement l'effet des nervures rectangulaires, triangulaires et trapézoïdales sur le transfert de chaleur laminaire dans un canal soumis à un flux thermique constant. Dans cette étude, ils ont utilisé un nanofluide eau-Ag comme fluide de refroidissement. Ils ont également choisi des nombres de Reynolds de 1, 5 et 100 correspondants à un écoulement laminaire, ainsi que des fractions volumiques de nanoparticules d'argent (Ag) de 0 %, 2 % et 4 %. Les résultats indiquent que la forme triangulaire présente les meilleurs critères d'évaluation des performances thermiques pour l'écoulement laminaire. Pour des nombres de Reynolds élevés, les nervures trapézoïdales sont recommandées

LEBBIHI Saci et al.[16] à présenter une étude théorique et numérique de refroidissement par convection libre laminaire stationnaire dans une cavité rectangulaire placée dans différentes positions remplie d'un nano-fluide (eau-cuivre). Les simulations numériques sont réalisées en utilisant logiciel CFD (l'Ansys Fluent) pour étudier l'effet de la fraction volumique, nombre de Rayleigh et la position de la source de chaleur sur l'échange par convection. Les résultats montrent que l'ajout des nanoparticules provoque une amélioration du transfert de chaleur par convection, à partir de ce travail le nano-fluide utilisé est un fluide favorable par rapport les fluides de base pour le système de refroidissement.

CHAREF KHOUDJA Nabila [17] à présenter une étude numérique des écoulements dans les micro-canaux. Le but de ce travail est de simuler l'écoulement et le transfert thermique de l'eau à travers un micro-canal rectangulaire (figure II.1). La simulation est effectuée à l'aide du code de calcul l'Ansys fluent qui est basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus au cours des différentes simulations comparés avec ceux théoriques et expérimentaux obtenus par Gao et all.
Enfin de cette étude, Les résultats montrent que les valeurs de Nusselt sont en bon accord avec les lois théorique, le coefficient de transfert thermique est plus affecté que le facteur de frottement par la réduction de la taille du canal. Donc les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux (obtenus par Gao).

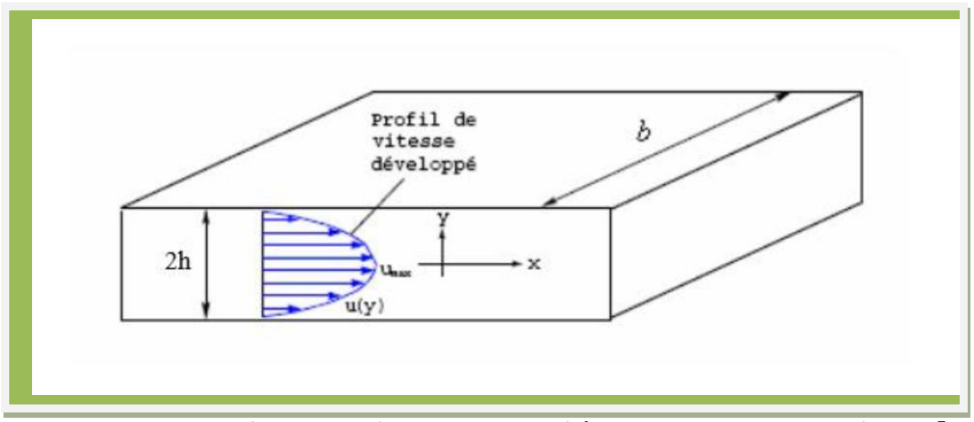


Figure II.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire **[17].**

Synthèse de l'étude bibliographique :

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre montre que le thème du refroidissement des composants électroniques par convection forcée utilisant des nano-

fluides est d'un intérêt majeur en mécanique des fluides et en l'amélioration du transfert de chaleur et les performances thermiques des systèmes électroniques.

Ces études permettent de mettre en évidence l'influence de divers paramètres physiques et surtout l'ajout des nanoparticules sur l'écoulement et le transfert de chaleur. Les travaux de recherche utilisent des différentes méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis et des volumes finis.

Cette étude bibliographique nous a inspiré une configuration physique de refroidissement des composants électronique à travers un micro canal par un nanofluide.

II.2- Formulation du problème :

Ce travail insiste d'étudier la simulation numérique d'un phénomène physique-thermique qui est le refroidissement d'un composant électronique à travers des micro-canaux d'une forme rectangulaire basé sur un écoulement laminaire d'un nano-fluide sous le type de la convection forcée.

II. 2.1 - La configuration géométrique :

Le modèle physique considéré est représenté sur la figure II.2. Il s'agit d'un micro-canal rectangulaire horizontal de longueur L=400µm, et de hauteur l=100µm, parcouru par un nano fluide en régime d'écoulement laminaire. À l'entrée du canal, le fluide pénètre avec une vitesse V_0 uniforme, une température T_f (froide) et une concentration uniforme. La paroi inférieure du canal est supposée adiabatique, tandis que la paroi supérieure comporte trois sources de chaleur identiques maintenues à une température constante Tc=65°C.

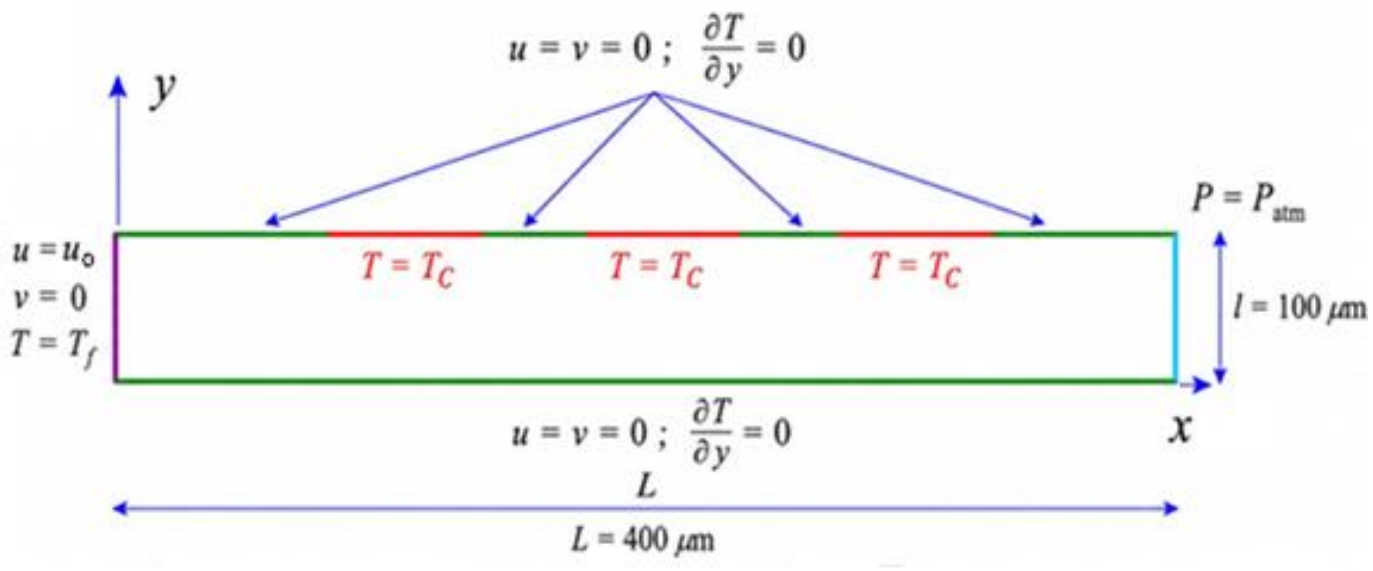


Figure II.2 : Configuration physique du phénomène étudié.

Les portions restantes de la paroi supérieure sont considérées adiabatiques. Une condition de non-glissement est imposée sur les parois solides, ce qui conduit à des vitesses nulles au voisinage des parois (u=v=0). La pression à la sortie est supposée égale à la pression atmosphérique ($P=P_{atm}$).

II.2.2- Les équations générales :

Dans le cadre de la convection forcée bidimensionnelle, le comportement de l'écoulement et du transfert thermique est régi par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie qui s'écrivent comme suit [18]:

-Equation de continuité (conservation de la masse) :

C'est la formule de la loi de conservation de la masse pour le volume de contrôle du matériau. Mathématiquement, il s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \vec{u}) = 0 \qquad \text{II.1}$$

-Equation de conservation de la quantité de mouvement :

Également connue sous le nom de deuxième loi de Newton, cette loi établit la relation entre les propriétés du mouvement des fluides et les causes qui le produisent.

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho g - \nabla.p + \mu \nabla^2 \vec{v} \qquad \text{II.2}$$

-Equation d'énergie :

Il obéit à la première loi de la thermodynamique :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.\mathbf{k}\nabla \mathrm{T} + \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \mu\phi \qquad \text{II.3}$$

II.2.3-Hypothèses simplificatrices :

Afin de modéliser le refroidissement des composants électroniques par un nano fluide, les hypothèses suivantes sont retenues :

● Le régime d'écoulement est laminaire.

● Le nanofluide est considéré homogène, newtonien et incompressible.

● L'écoulement est bidimensionnel et permanent ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).

● Les propriétés thermo physiques du nanofluide sont supposées constantes.

● Les nanoparticules sont uniformément dispersées dans le fluide de base.

● Les effets de la gravité, de la dissipation visqueuse et du rayonnement thermique sont négligeables.

●le contact thermique entre les composants et le nanofluide est supposé parfait.

II.2.4- Formulation mathématique du problème :

Compte tenu des hypothèses simplificatrices, l'équation à deux dimensions peut être écrite comme suit [18]:

-Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad \text{II.4}$$

-Équation de quantité de mouvement :

- Suivant l'axe x :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad \text{II.5}$$

- Suivant l'axe y :

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad \text{II.6}$$

Equation Energie :

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad \text{II.7}$$

Avec : $\boldsymbol{\alpha}=\frac{\boldsymbol{k}}{(\boldsymbol{\rho Cp})}$ est la diffusivité thermique

II.2.5- Les conditions aux limites :

A la paroi du bas : $0\leq x\leq 400$; $y=0$ $\quad u=v=0$, $\frac{\partial T}{\partial y}=0$ (adiabatique)

A la paroi haute : $0\leq x\leq 120$; $160\leq x\leq 180$; $220\leq x\leq 240$; $280\leq x\leq 400$; $y=100$ $\quad u=v=0$, $\frac{\partial T}{\partial Y}=0$ (adiabatique)

Et $120\leq x\leq 160$; $180\leq x\leq 220$; $240\leq x\leq 280$; $y=100$ $\quad u=v=0$, $T=T_c$

A la paroi gauche : $x=0$; $0< y < 100$ $\quad u=u_0$, $v=0$ et $T=T_f$

A la paroi droite : $x=400$; $0 < y < 100$ $\quad P=P$ atm

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse d'une étude bibliographique des travaux traitant le problème de refroidissement des composants électroniques par circulation des nanofluides dans des micro canaux et son intérêt majeur en dans l'amélioration du transfert de chaleur et les performances thermiques des systèmes électroniques.

Dans le prochain chapitre nous présentons la méthode et les outils de résolution notamment les logiciels fluent Ansys et gambit, afin d'analyser le problème physique étudiée dans ce travail.

Chapitre III :

Méthode et outils de résolution

III-1 Introduction :

La résolution des équations de conservation est un domaine clé de la modélisation et de la simulation dans de nombreux domaines scientifiques et d'ingénierie. Ces équations sont utilisées pour décrire la conservation de certaines quantités physiques importantes, telles que la masse, l'énergie et la quantité de mouvement, dans un système donné. La résolution de ces équations permet de comprendre et de prédire le comportement des fluides, des particules, des polluants, et bien d'autres phénomènes physiques.

Dans ce travail, nous avons opté pour une approche numérique moyennant le code commercial FLUENT [19] qui est basé sur la méthode des volumes finis pour la discrétisation des équations gouvernantes.

Dans ce chapitre, nous utiliserons la méthode des volumes finis (MVF) pour résoudre notre problème dynamique en utilisant le logiciel commercial Fluent.

III-2 Méthodes des volumes finis (MVF) :

La méthode des volumes finis est une approche numérique utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles, y compris les équations de conservation. Elle consiste à diviser le domaine d'étude en petits volumes, appelés cellules ou éléments finis, afin d'approximer les quantités physiques à l'intérieur de chaque volume.

III-3 Description du logiciel Gambit :

Gambit est un logiciel de modélisation géométrique et de génération de maillage tridimensionnel utilisé dans le domaine de la mécanique des fluides numérique (CFD). Développé par Fluent Inc., maintenant une partie d'ANSYS Inc., Gambit permet aux utilisateurs de créer, modifier et analyser des géométries complexes. Il offre une interface graphique conviviale pour la création de surfaces, de volumes, de conditions aux limites, et facilite la génération de maillages de haute qualité. Gambit est largement utilisé pour préparer des modèles géométriques pour des simulations CFD avancées.

Le Gambit regroupe trois fonctions essentielles :

- Modélisation géométrique
- Génération de maillage
- Préparation des modèles pour les simulations CFD
- Analyse de la géométrie
- Interaction avec d'autres logiciels

III.3.1 Interface et étapes de Gambit :

III.3.1.1. Lancer Gambit

Après lancement du le logiciel, l'interface d'utilisation :

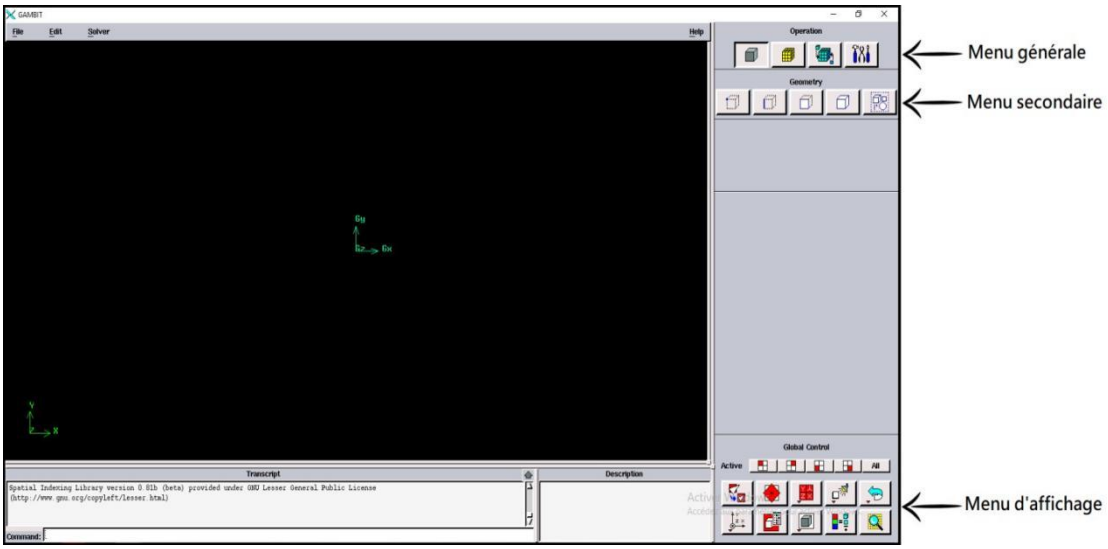


Figure III.1 : Interface de GAMBIT

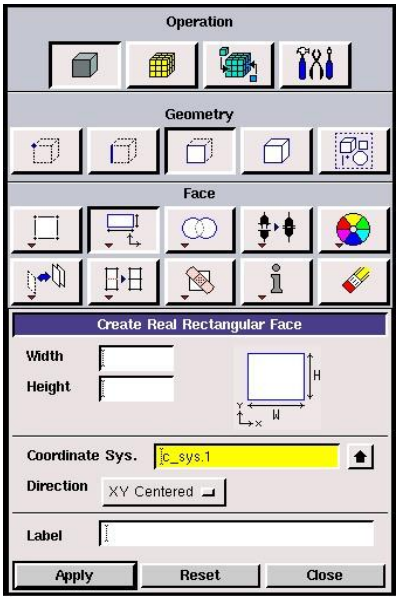


Figure III.2 : Construction de la géométrie

Pour créer notre géométrie 2D dans Gambit, nous avons suivi la méthode point par point, en reliant ensuite ces points par des arrêts (edges) dans toutes les directions. Ensuite, nous avons créé les faces nécessaires pour obtenir la géométrie souhaitée.

Dans notre cas d'étude on a suivi la méthode du maillage structuré de type *exponen*t avec 0.6 Ratio avec des mailles d'intervalle de déférentes tailles pour bien préciser les écoulements sur la couche aux limites.

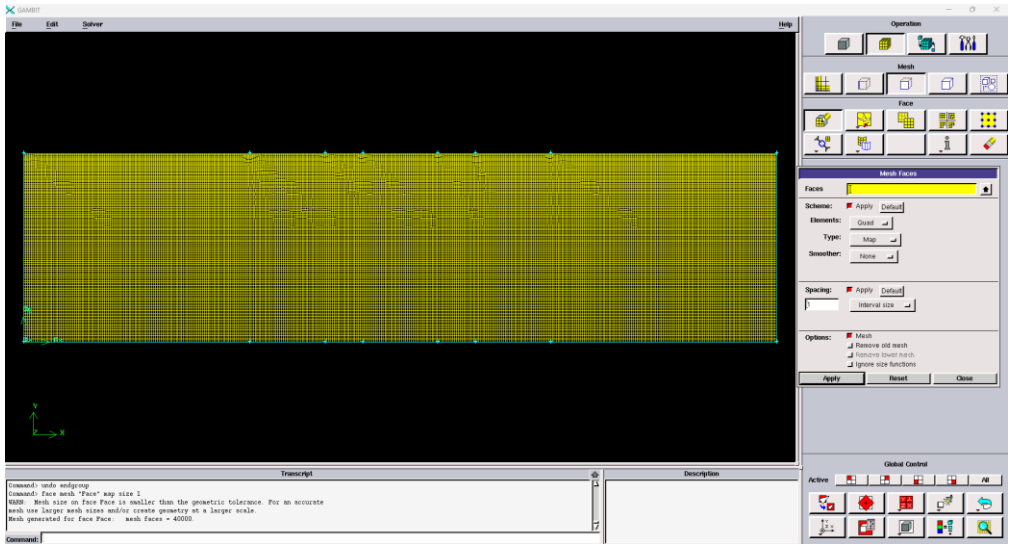


Figure III.3 : Génération de maillage

III.3.1.2. Les conditions aux limites

La figure suivante présente un récapitulatif des différentes conditions pouvant être imposées pour modéliser l'écoulement d'air dans une cavité carrée en mouvement.

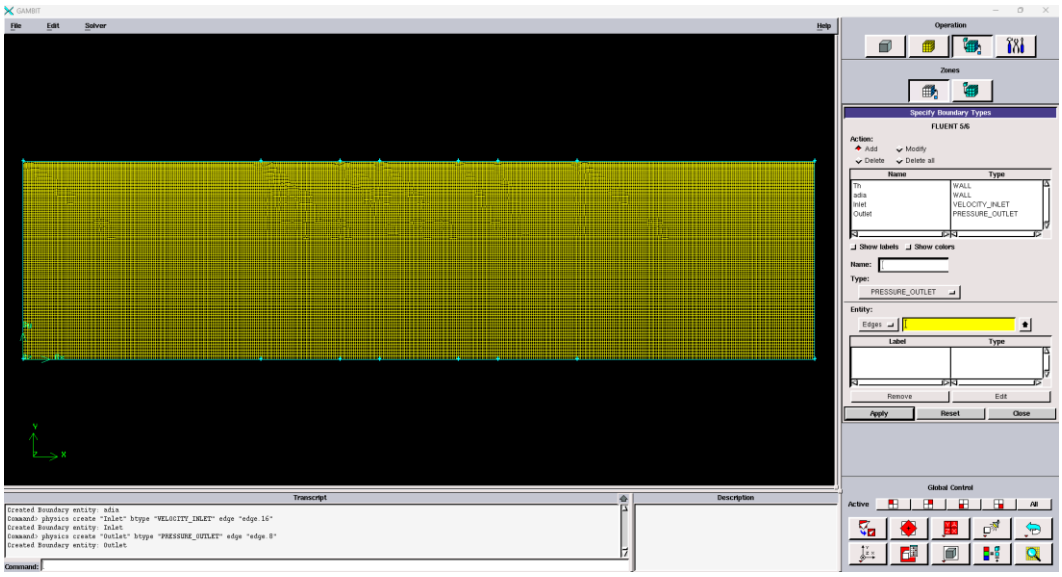


Figure III.4 : Incorporation des conditions aux limites

III.3.1.3. Exportation du maillage de Gambit :

Une fois la géométrie créée et les conditions aux limites définies, le maillage est exporté vers le solveur Fluent en suivant les étapes suivantes : **File → export → mesh**

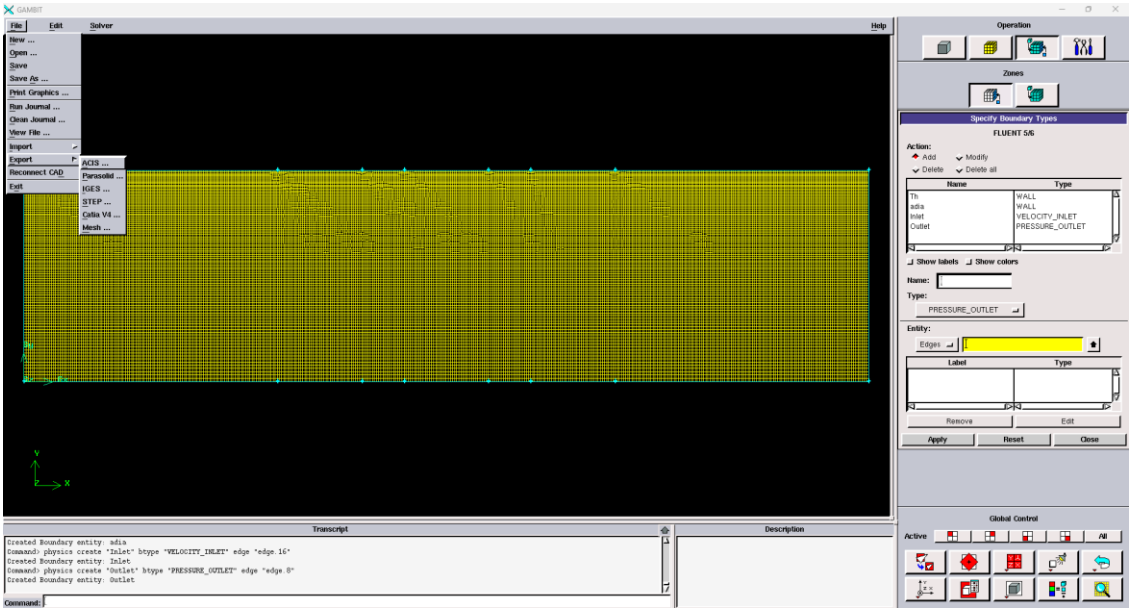


Figure III.5 : Exportation du maillage.

Il nécessite d'exporter le maillage, en format **«. Msh »** pour que fluent soit valable pour le lire et de l'utiliser après enregistrement, comme suit :

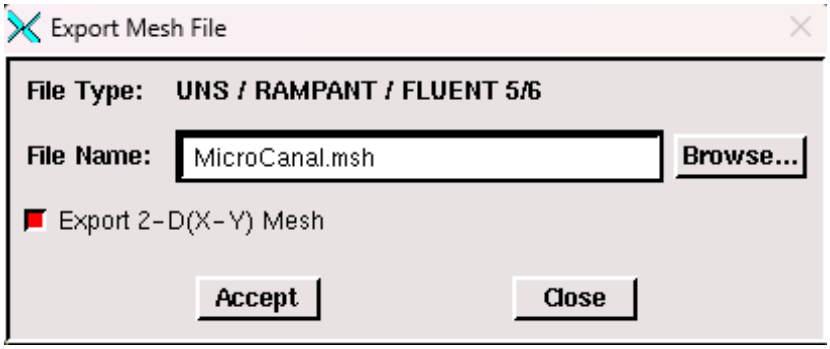


Figure III.6 : enregistrement du maillage

III.4. Le solveur fluent et Les étapes de solveur fluent :

Fluent est un logiciel de mécanique des fluides numérique (CFD) utilisé pour simuler et analyser les écoulements fluides et les phénomènes thermiques [19]. Il permet aux utilisateurs de modéliser des géométries complexes, d'appliquer des conditions aux limites, de spécifier les propriétés du fluide, et de résoudre les équations de conservation associées aux écoulements.

III.4.1. Lancer Fluent :

Étant donné que notre géométrie est en 2D, nous avons choisi d'utiliser la précision double (2ddp) pour notre étude dans le domaine de calcul. Cette option est distinguée de la manière suivante :

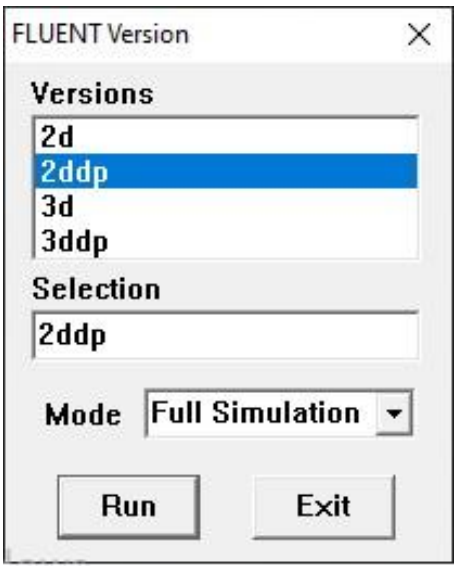


Figure III.7 : distingué le domaine de calcule 2ddp

III.4.2. Importation de la géométrie :

Pour commencer l'étude il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit par l'étape suivante :

File → Read → Case

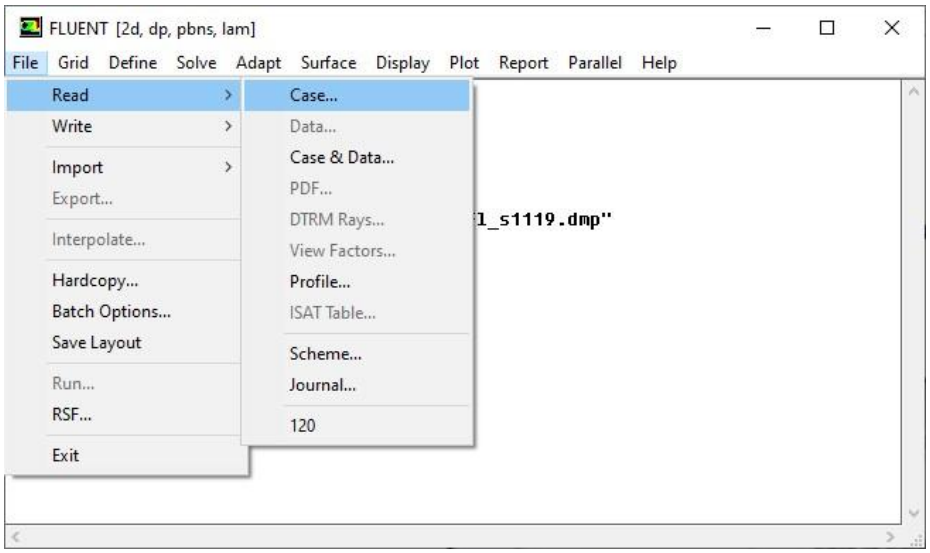


Figure III.8 : Importation de la géométrie.

Le principal menu que nous allons utiliser est le menu **Grid.**

III.4.3. Vérification du maillage :

Permet de vérifier si le maillage importé ne comporte pas des déformations : **Grid → Chek**

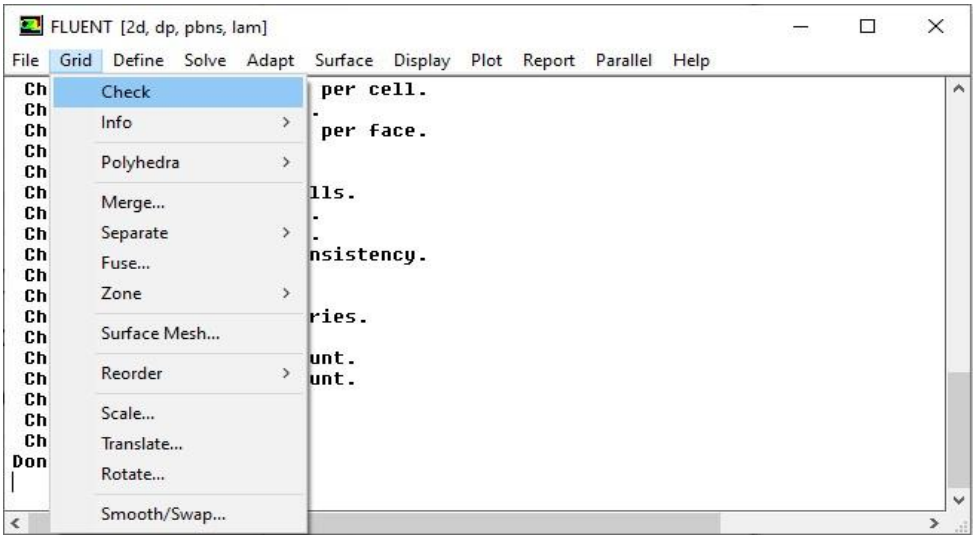


Figure III.9 : Vérification du maillage

III.4.4. Vérification des unités et des dimensions :

Il faut vérifier que les dimensions et les unités affichées satisfassent aux dimensions du modèle physique de notre cas : **Grid → Scale**

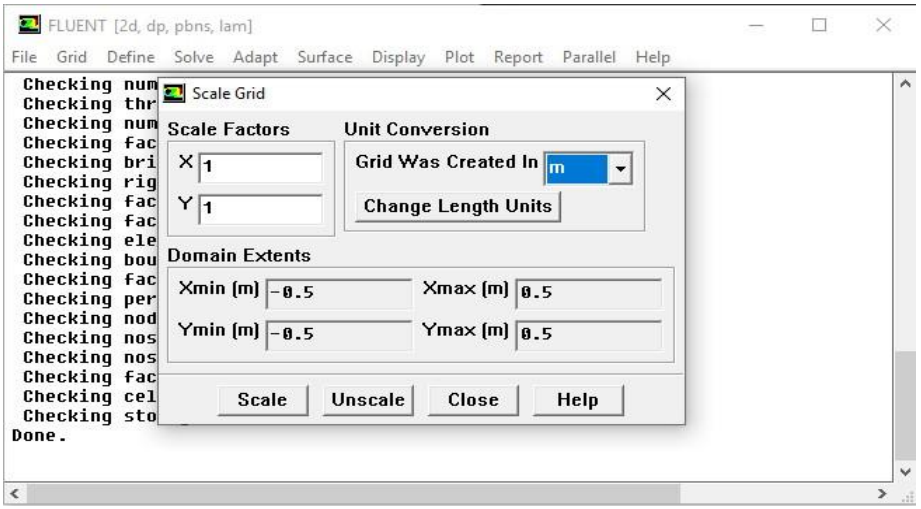


Figure III.10 Vérification les dimensions et les unités

Remarque : pour vérifier que la géométrie ressemble parfaitement à ce que l'on veut, il est possible de vérifier la forme de la grille en cliquant **: display → grid**

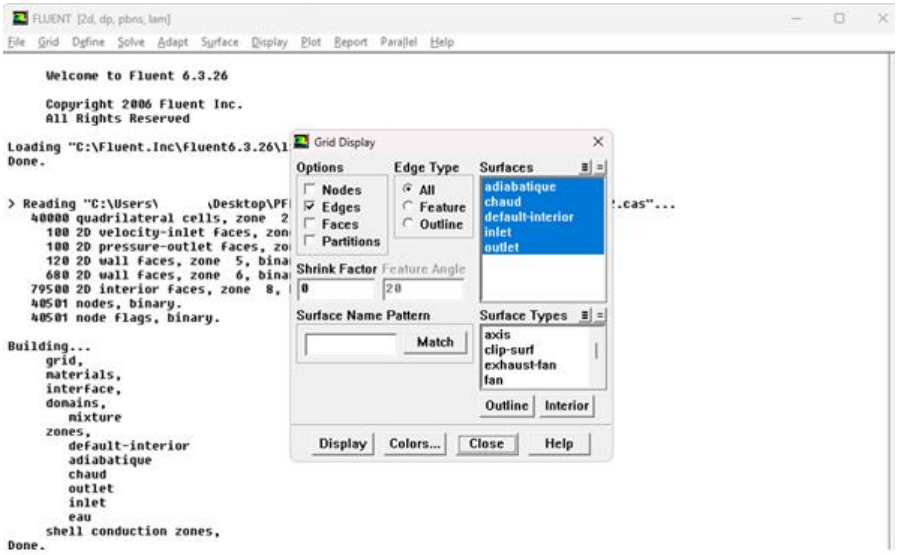


Figure III.11 Vérification la forme de la grille en cliquant

Après avoir vérifié le maillage avec une échelle adaptée, nous procéderons à la détermination des paramètres de calcul, qui se trouvent dans le menu **Define**.

III.4.5 Définition du modèle et choix du solveur :

Ce menu permet de choisir le type de *solver* que l'on souhaite utiliser (schéma implicite, régime stationnaire, configuration 2D…) définit comme suit :

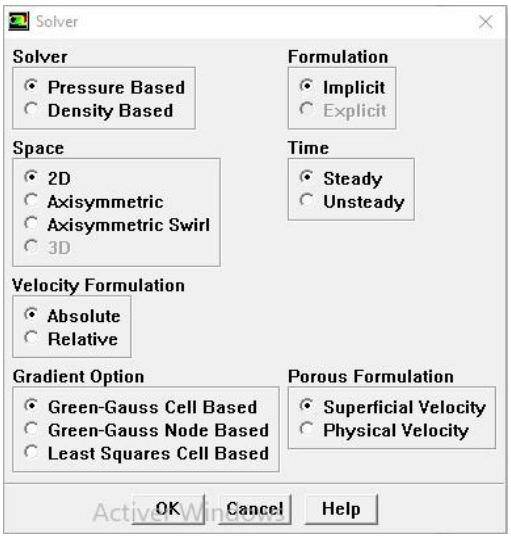


Figure III.12 : Choix du solveur

III.4.5.1. Choix du régime d'écoulement :

Différentes modélisations de l'écoulement existent, comprenant les écoulements non visqueux, laminaire et turbulents. **Define → Models → Viscous**

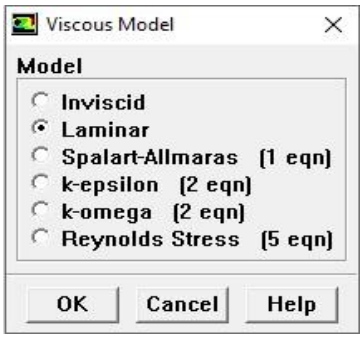


Figure III.13 : Choix de modèle laminaire

Dans le menu **Models** qui est à utiliser en fonction de l'énoncé du problème.

III.4.5.2. Les caractéristiques du matériau :

On définit le choix de fluide comme suit : **Define -- Materials**

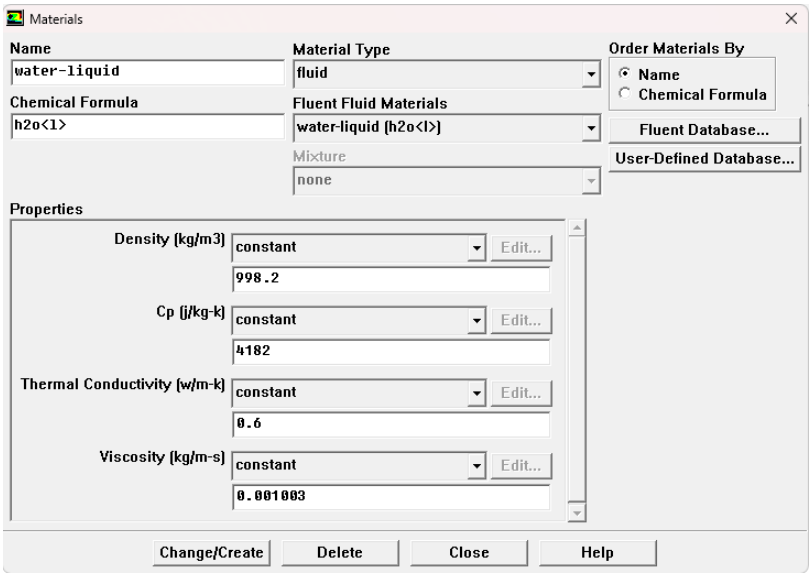


Figure III.14 : Les caractéristiques du matériau

III. 4.5.3. Les conditions opératoires :

Cette étape permet de définir les conditions de fonctionnement :

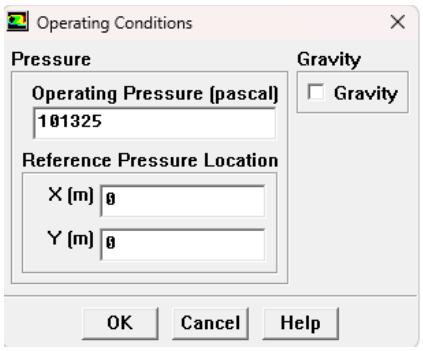


Figure III.15 : choix des conditions opératoires

III.4.5.4. Les conditions aux limites :

Il est important de spécifier les valeurs des conditions aux limites du problème à résoudre :

Define → Boundary conditions

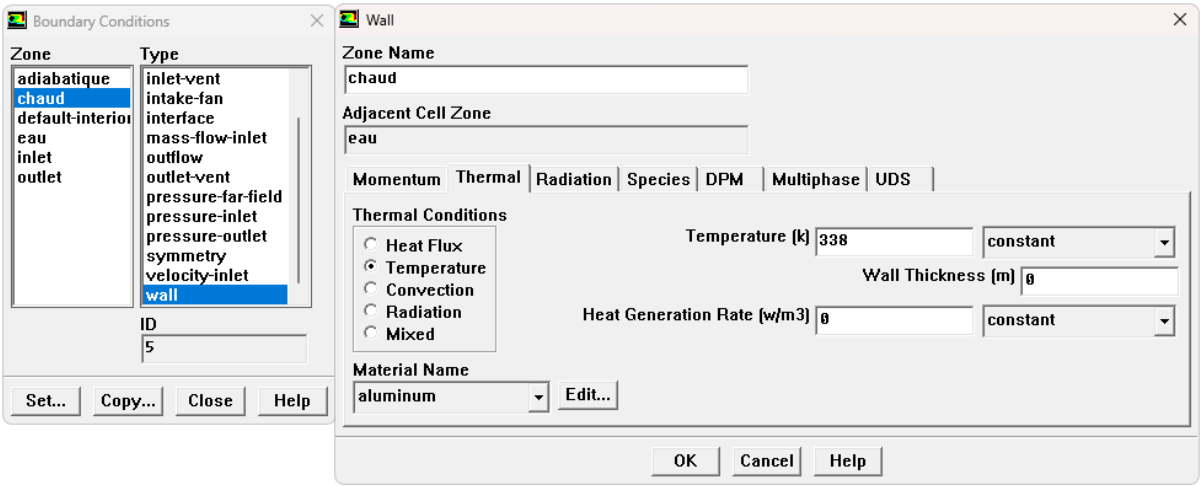


Figure III.16 : la température au niveau de la paroi chaude (conditions aux limites)

Le menu "Solve" permet de configurer les différents éléments nécessaires pour initialiser le solveur de Fluent.

III.4.6 Le solveur

III.4.6.1. Contrôle de la solution :

Cette étape nous permis d'estimer les schémas de discrétisations, ainsi que le choix d'ordre des équations et l'algorithme (ou choix de solution). ***Solve – Control – Solution***

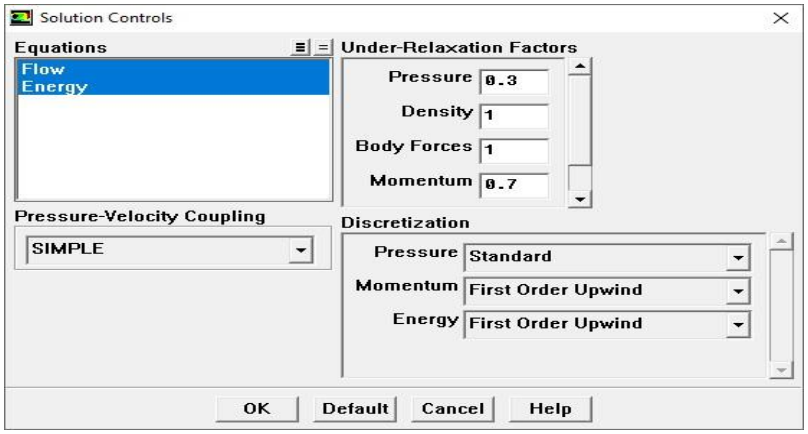


Figure III.17 : Choix d'ordre d'équation

III.4.6.2. Initialisation :

Cette option permet d'initialiser le calcule **: *Solve* → *Initialize* → *Initialize***

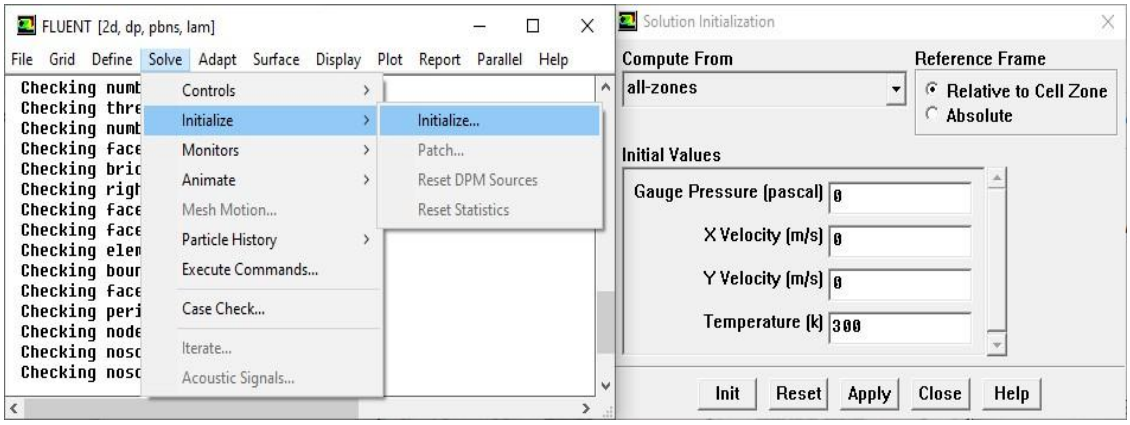


Figure III.18: initialisation de calcul

III.4.6.1.3. Choix des critères de convergence :

Il se fait de favoriser les critères de convergence qui doivent être considérés pour que les calculs soient arrêtés : S**olve → Monitors → Résidual**

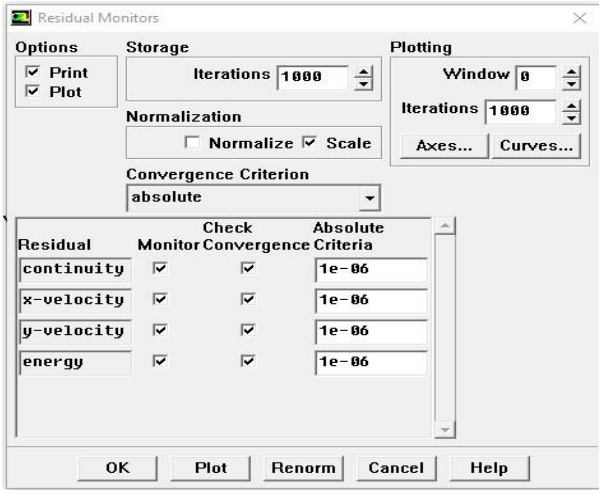


Figure III.19 : Choix des critères de convergence

Remarque : Pour afficher la convergence sous forme d'un graphique à l'écran pendant les calculs, il est nécessaire d'activer l'option de tracé (Plot).

III.4.6.1.4. Lancement du calcul de convergence :

Avant commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations : ***solve → iterate***

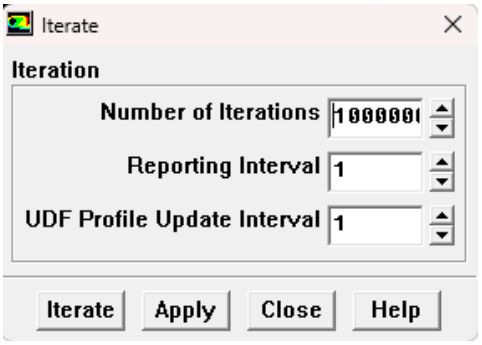


Figure III.20 : Choix du nombre des itérations

III.4.6.1.5. Allures de l'évolution des résidus de calcul :

Le calcul est considéré comme convergé lorsque le résidu devient stable.

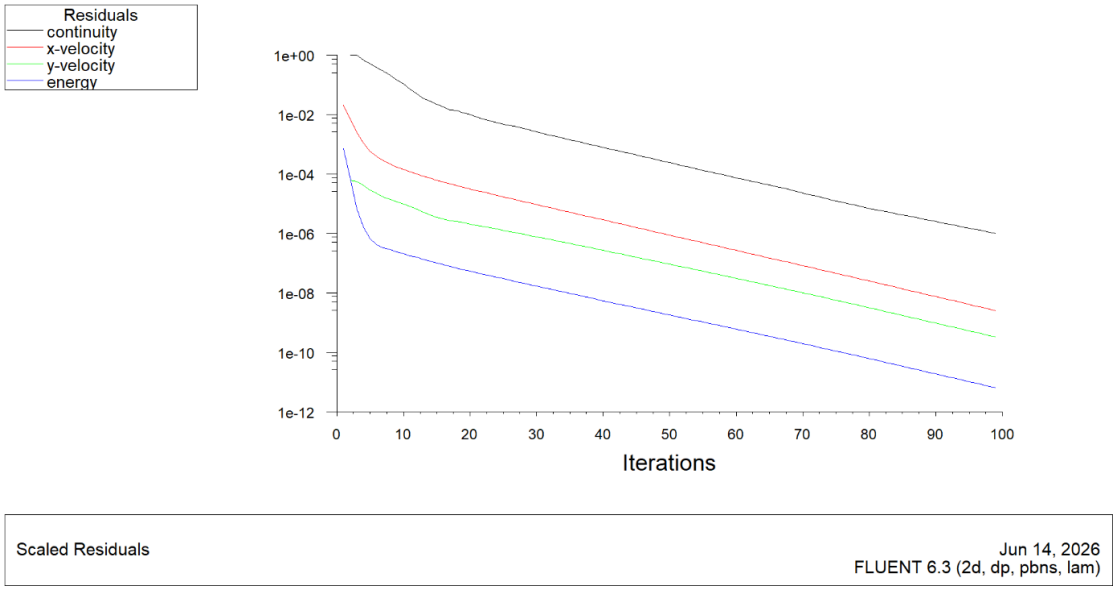


Figure III.21 : Allures de l'évolution des résidus de calcul pour maillage 100x400

Il est possible de visualiser et d'analyser les résultats à l'aide des fonctionnalités de post-traitement fournies par Fluent.

Ces fonctionnalités sont principalement :

❖ **Display**

1. Le premier menu "Contours" permet d'étudier les variations des variables sous forme de lignes de courant, de profils de vitesse, etc. : **Display → Contours**...

2. Le second menu "Vectors" permet de représenter les valeurs à l'aide de vecteurs pour visualiser les champs de vitesses : Display → Vectors.

❖ **Surface**

Surface : visualisation des zones expriment du maillage (ligne, plans…), cette option Surface permet de créer les lignes ou les plans dans la géométrie à partir des points.

❖ **Plot**

« Plot » offre la possibilité de créer des graphiques en 2D pour toutes les variables le long des lignes ou des plans créés.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure de résolution du problème physique sur Gambit/Fluent ou nous avons expliqué les étapes à suivre : création de la géométrie, définition des conditions aux limites, export du maillage vers Fluent, configuration des paramètres de calcul, résolution numérique, suivi de la convergence, visualisation et analyse des résultats. Cette approche permet de simuler et étudier les écoulements fluides et thermiques de manière précise et efficace.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats et discussion du problème étudié.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Etude de maillage :

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé la configuration physique étudié (figure II.2) avec fluide de refroidissement le fluide de base (l'eau). Nous avons utilisé différentes tailles de maillage : 50x200, 100x400, 150x600.la vitesse d'entrée du fluide est de u_0=0.2 m/s. Le paramètre de comparaison pour la validation du maillage était Les profils de température et les profils de vitesse ainsi que les isotherme et lignes de courant.

L'analyse des donnés on permet de remarquer pour les profils de vitesse (u) le long de la verticale tracée au milieu du canal, à x=L/2, que le maillage 100x400 et 150x600 presque se superposent (figure IV.2). La même remarque est observée aussi sur les profile de température sur l'axe du canal (figure IV.1). De ce fait, et par rapport au profile de vitesse u, le maillage 100x400 sera adapté pour la suite de notre étude.

Les figures IV. 3 et IV.4 montrent les isothermes et les lignes de courant pour les différents maillages étudiés.

Nous remarquons que l'épaisseur thermique de la couche limite augmente dans la direction de la sortie du fluide ce qui permet d'évacuer la chaleur après le refroidissement des composants. Pour les lignes de courant, on montre le mouvement du fluide de l'entré vers la sortie du micro-canal.

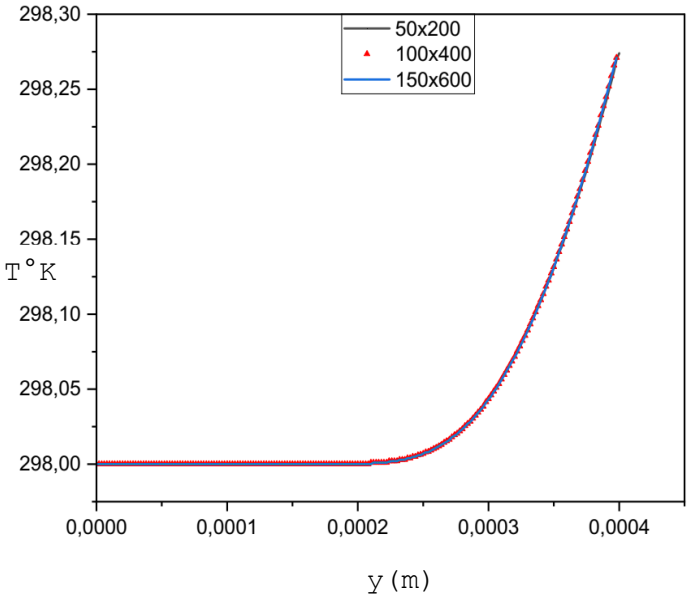


Figure IV.1. Profils de températures à x= 0.5L pour différents maillages

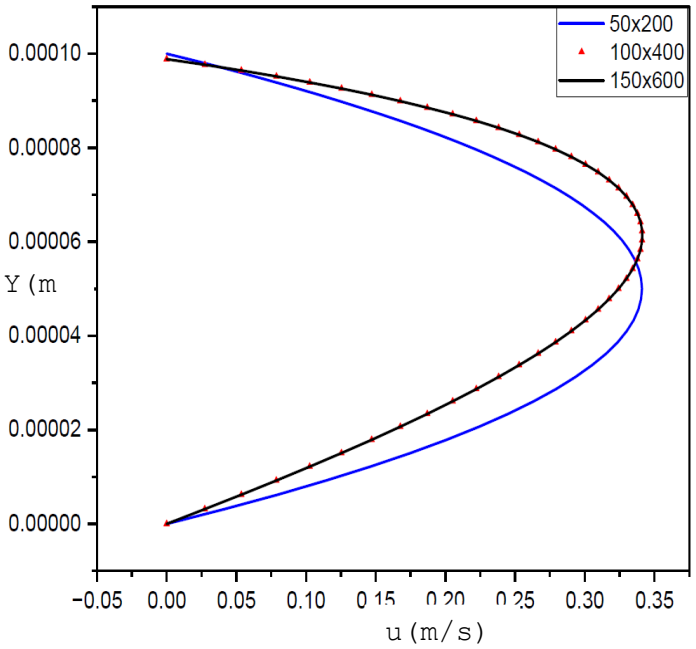


Figure IV.2. Profils de vitesse u en (m/s) à x= 0.5L pour différents maillages

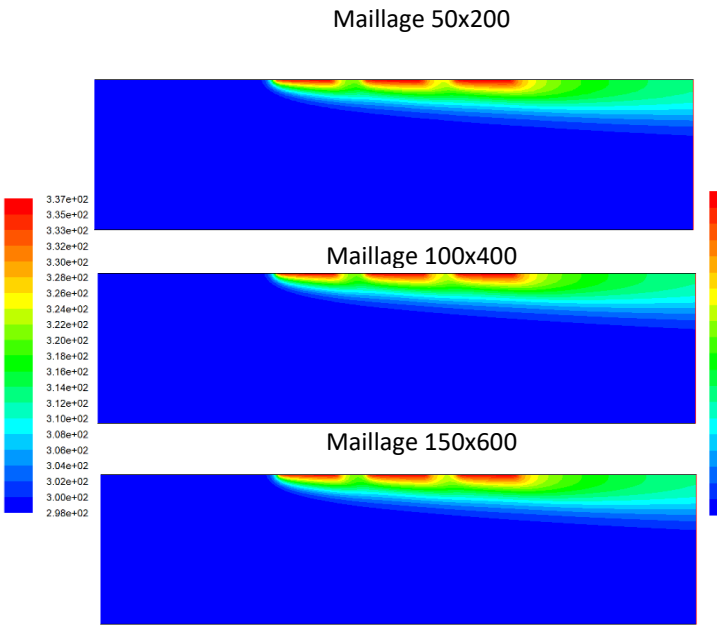


Figure IV.3. Les isothermes pour différents maillages

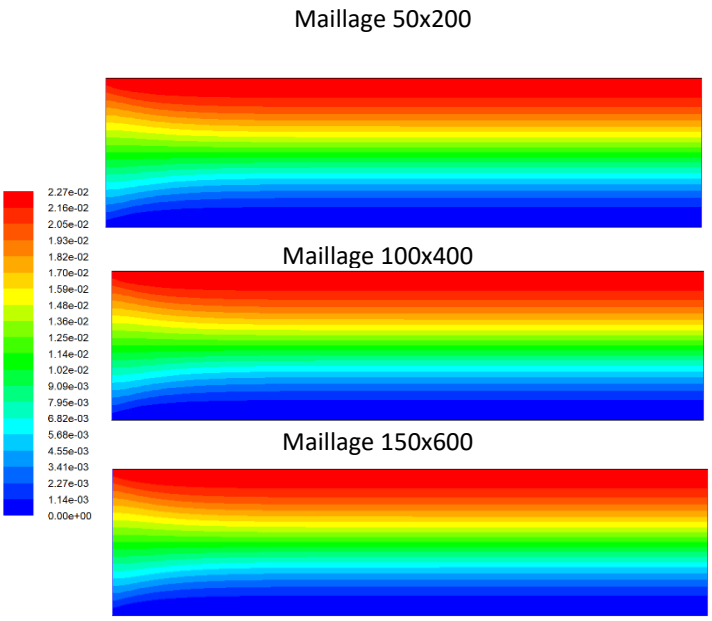


Figure IV.4. Les lignes de courants pour différents maillages

VI.2 Etude de l'effet de la nature et concentration du Nanofluide :

Dans cette partie nous allons utiliser comme fluide de refroidissement des nano-fluides notamment (**Eau-CuO)** et **(Eau-Al_2O_3)**. La concentration est variée entre 1%, 2% et 3%. La vitesse de l'entrée du fluide est choisie de u_0=0.2 m/s.

a- Nanofluide (Eau-CuO) :

La figure VI.5 montre les isothermes pour les différentes concentrations du nano-fluide (eau-CuO), où on a remarqué la couche thermique qui augmente vers la direction de sortie du micro-canal

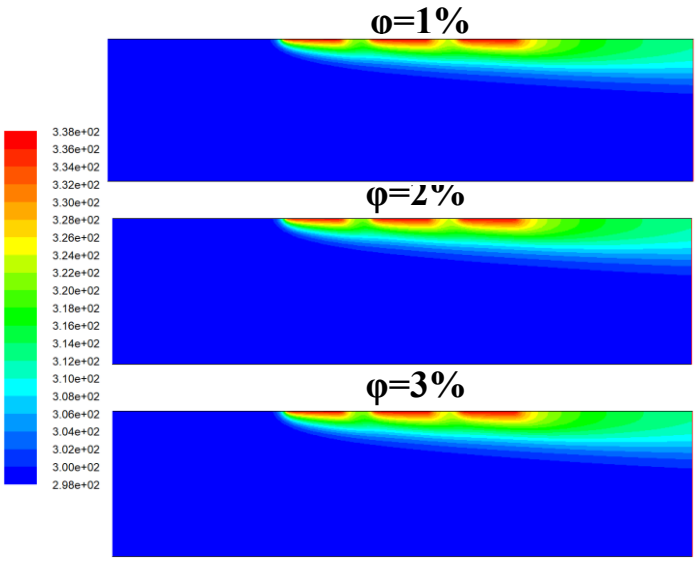


Figure IV.5. Les isothermes pour différentes concentrations de CuO à u_0 = 0.2 m/s

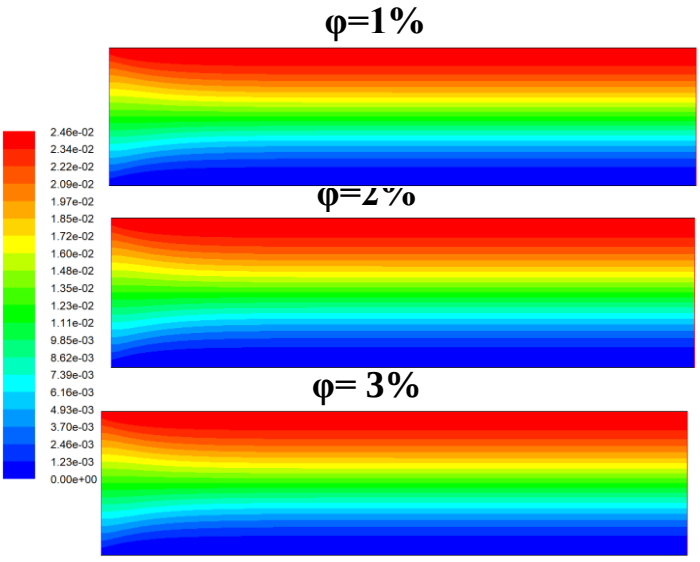


Figure IV.6. Les lignes de courants pour différentes concentrations de CuO à u_0 = 0.2 m/s

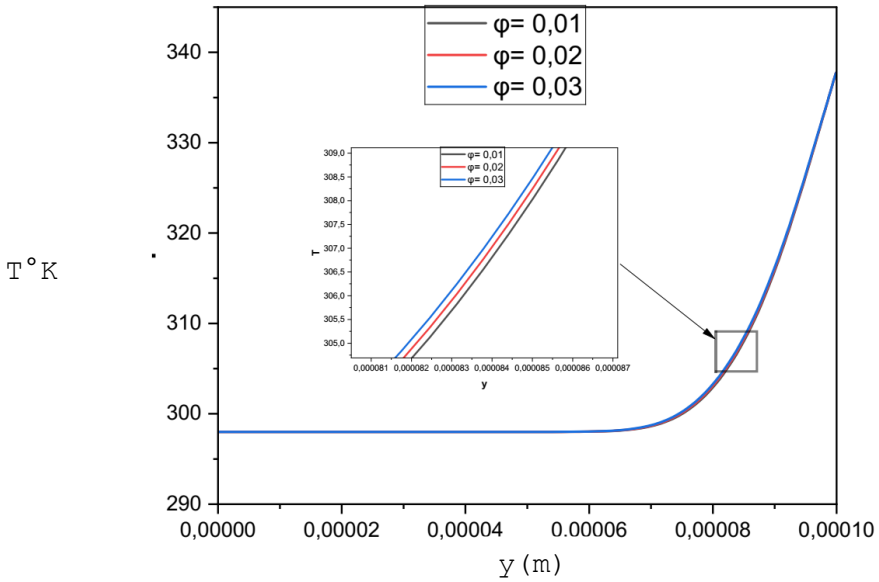


Figure IV.7. Profils de températures à x= 0.5L pour différentes concentrations de CuO à u_0 = 0.2 m/s

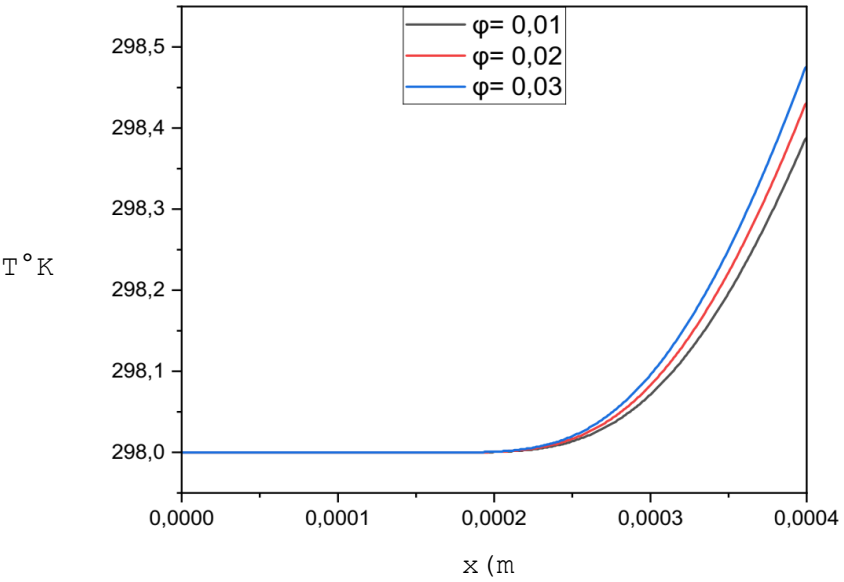


Figure IV.8. Profils de températures à y= 0.5H pour différentes concentrations de CuO à u_0 = 0.2 m/s

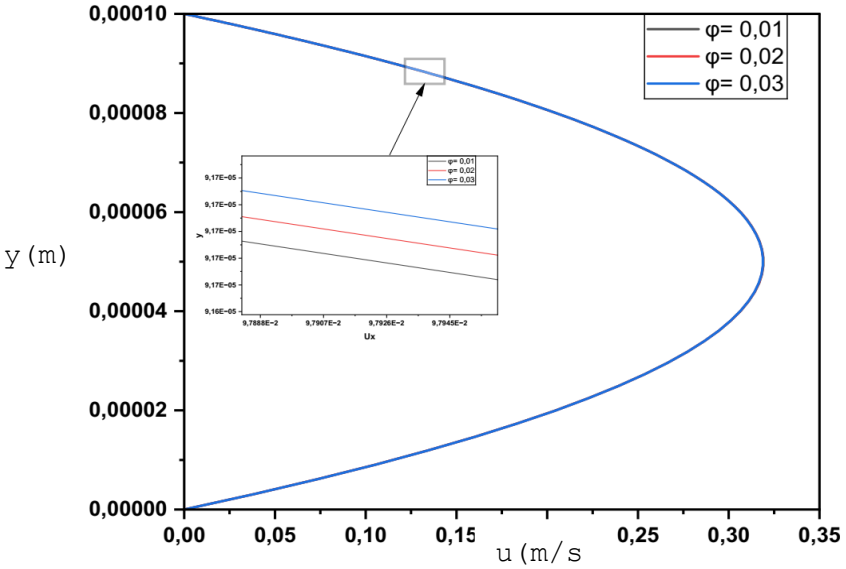


Figure IV.9. Profils de vitesses u à x= 0.5L pour différentes concentrations de CuO à u_0 u_0 = 0.2

De point de vue quantitatif ; la différence n'est pas très significative, ce qui nous a mené à tracer les profils de température au milieu vertical à x=0.5L (figure IV.7) et au milieu horizontal à y=0.5H (figure IV.8). On voie clairement la concentration du nano-fluide (eau CuO) augmente. L'évacuation de la chaleur en fonction de concentration, ceci est exprimé par la valeur de température à la sortie du micro-canal.

La figure IV.6 montre les lignes pour des différentes concentrations, où on voie le mouvement du fluide de l'entré vers la sortie.

Les profils de vitesse ; u à x=0.5L suivant y et v à y=0.5H pour les différentes concentrations sont tracés.

On remarque que la vitesse après le rentré du micro-canal augmente en fonction de la concentration jusqu'à ¼ de la distance du micro-canal après cette vitesse diminue et converge à la sortie du micro-canal. Ceci pourra être dû à l'interaction entre les particules.

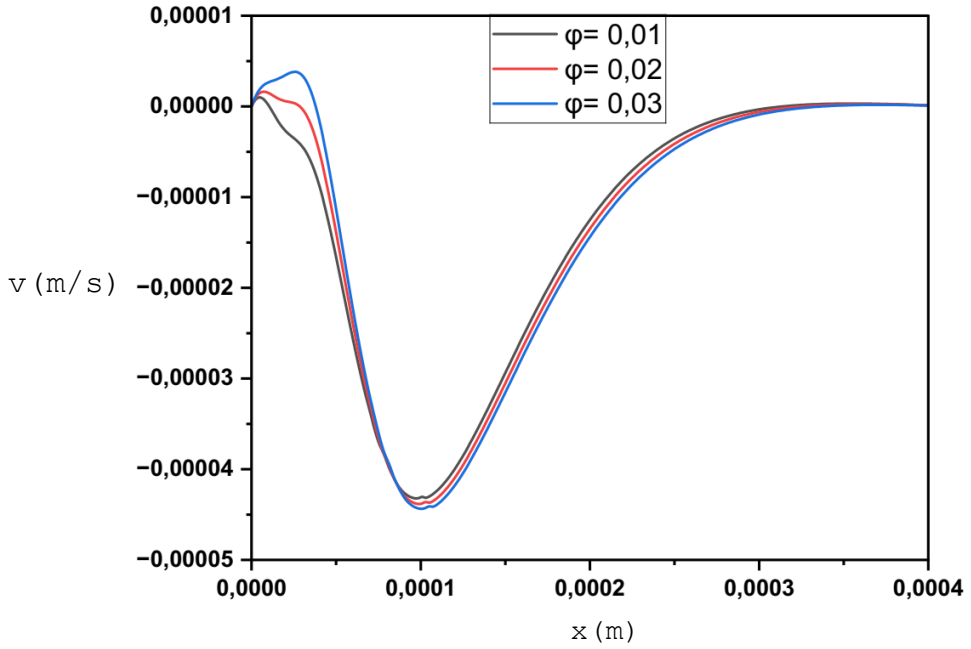


Figure IV.10. Profils de vitesses v en m/s à y= 0.5H pour différentes concentrations de CuO à u_0 = 0.2 m/s

b-Nanofluide (Eau-Al_2O_3) :

Pour le fluide (Eau-Al_2O_3**)**, nous avons tracé les isothermes (figure IV.11) et les lignes de courant (figure IV.12) à des différentes concentrations et une vitesse d'entré à u_0=0.2 m/s.

De point de vue quantitatif : les mêmes remarques ont été soulignées par rapport au (eau- CuO) concernant la couche limite thermique et les lignes de courant.

De point de vue qualitatif : les profils de température à x=0.5L (figure IV.13) et à y=0.5H (figure IV.14), on a dévoilé la même remarque concernant l'évacuation de la chaleur vers la sortie du micro-canal, par contre les profils de vitesse u à x=0.5L (figure IV.15) et v à y=0.5H (figure IV.16) ont montré que les particules du nano-fluide gardent le même profil de l'entré vers la sortie.

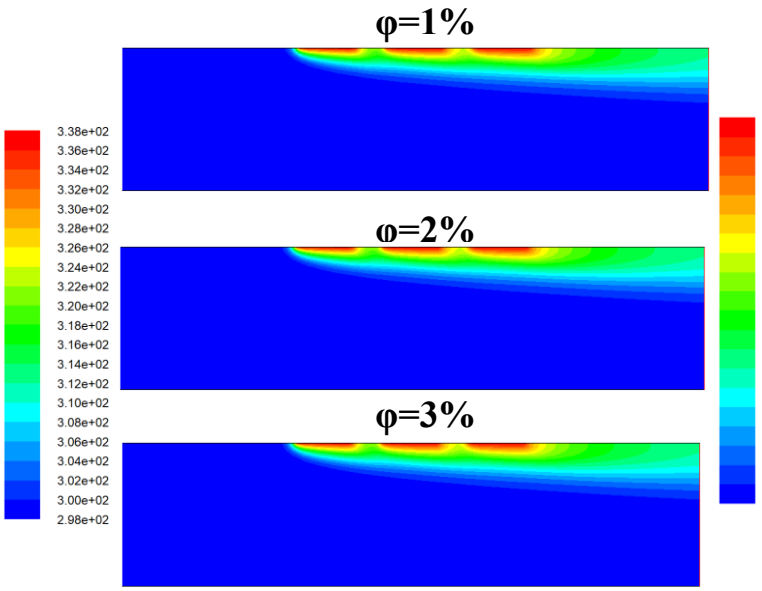


Figure IV.11. Les isothermes pour différentes concentrations Al_2O_3 à u_0 = 0.2 m/s

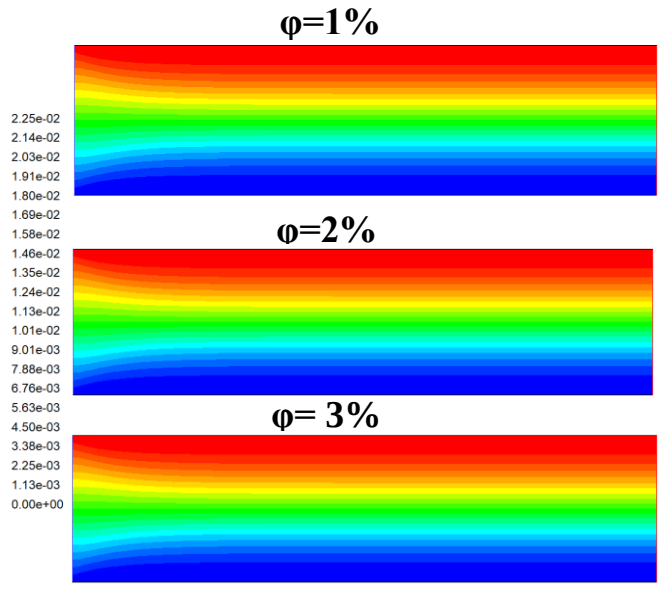


Figure IV.12. Les lignes de courants pour différentes concentrations Al_2O_3 à u_0 = 0.2 m/s

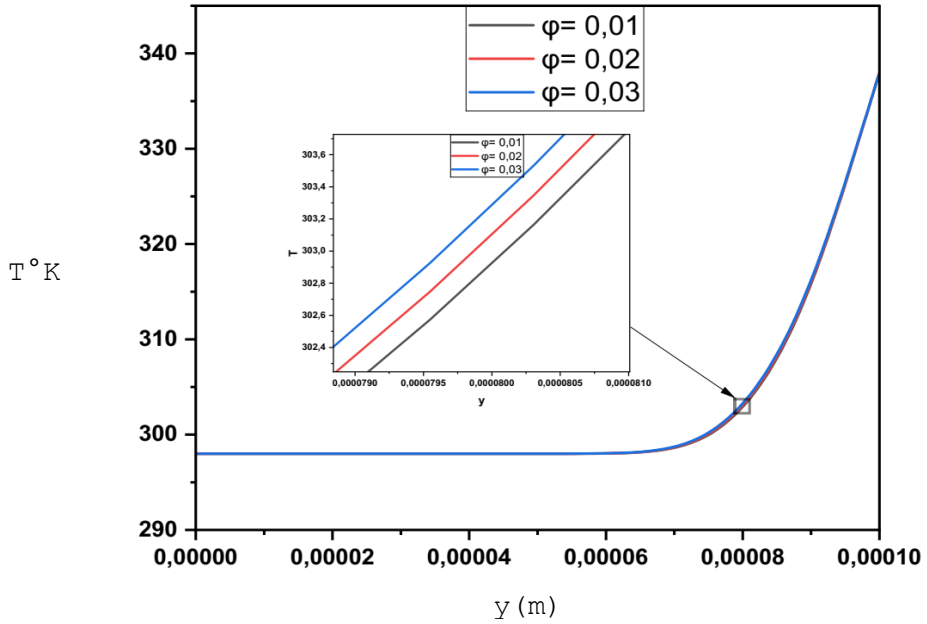


Figure IV.13. Profils de températures à x= 0.5L pour différentes concentrations de Al_2O_3 à u_0 = 0.2 m/s

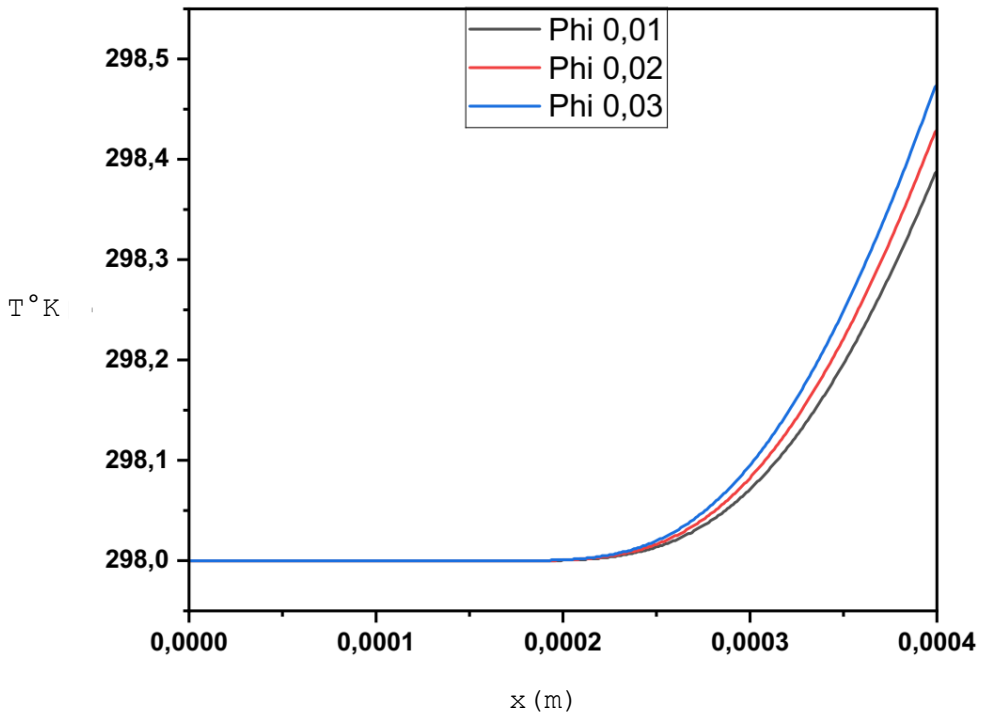


Figure IV.14. Profils de températures à y= 0.5H pour différentes concentrations de Al_2O_3 à u_0= 0.2 m/s

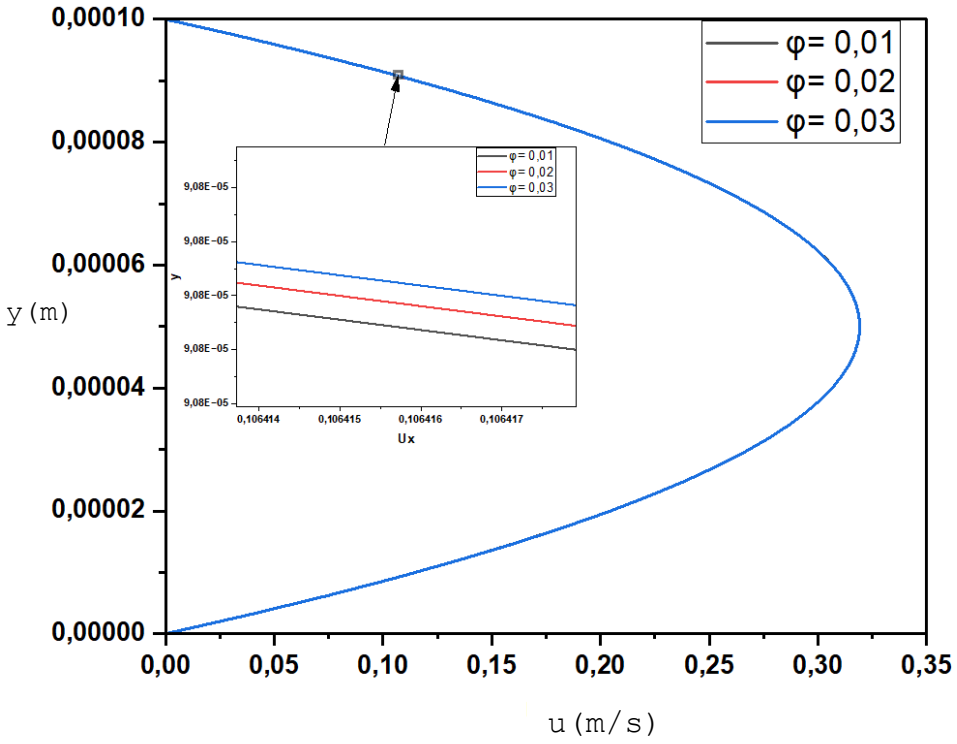


Figure IV.15. Profils de vitesses u en m/s à x= 0.5L pour différentes concentrations de Al_2O_3 à u_0 =0.2 m/s

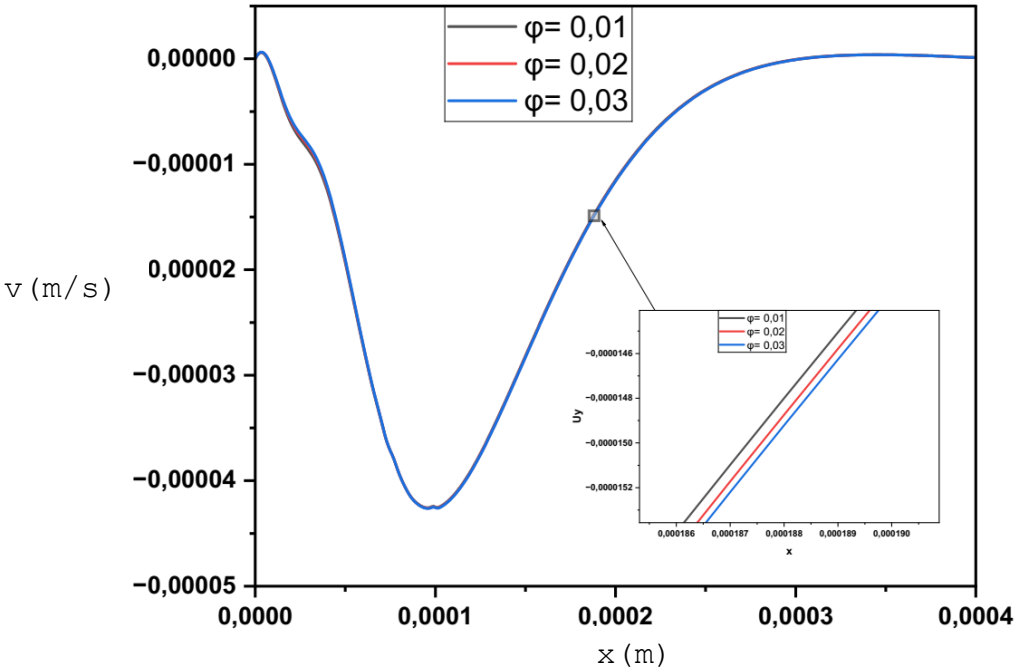


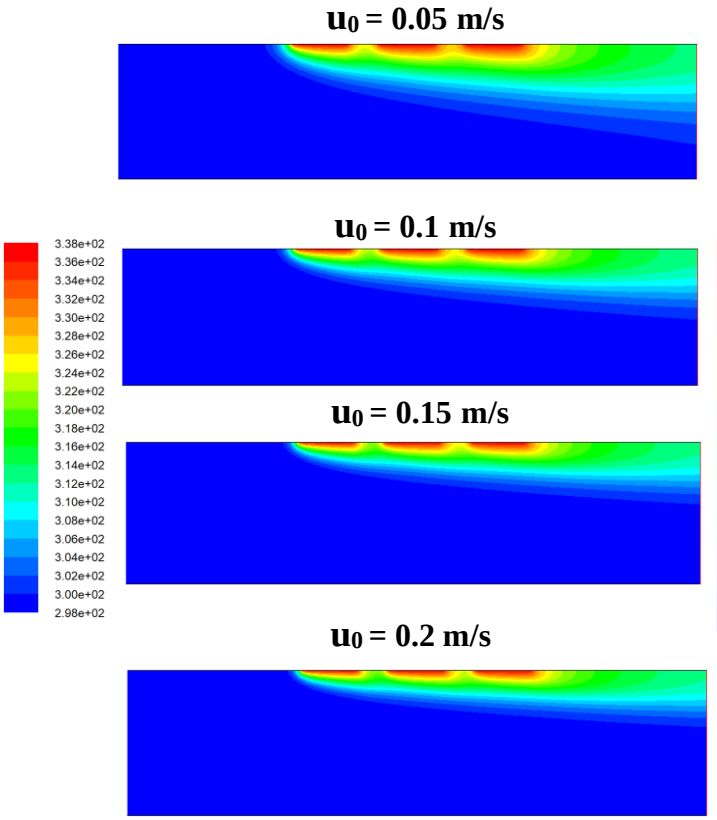
Figure IV.16. Profils de vitesses v à y= 0.5H pour différentes concentrations de Al_2O_3 à u_0= 0.2 m/s

VI.3 Etude de l'effet de la vitesse d'entrée :

Afin d'étudier l'effet de la vitesse d'entrée du fluide de refroidissement dans le micro canal, la vitesse est variée de 0.05, 0.1, 0.15, 0 ,2 m/sec. La simulation est effectuée pour les deux nanofluides notamment, (Eau-CuO) et (Eau-Al_2O_3) ainsi que le fluide de base.

Les résultats quantitatifs concernant les lignes de courant et les isothermes paraissent très équivalents. Nous présentons ces figures pour le cas de (Eau-CuO) (Figure IV.17 et IV.18). Nous avons remarqué que la couche limite thermique qui s'étend vers la sortie du micro-canal se rétrécie en fonction de l'augmentation de la vitesse de rentrée de fluide. Cette remarque se répète pour les trois fluides.

Afin d'analyse en mieux ces résultats, les profils de vitesse et température en été comparés. La figure IV.19 et IV.20 montrent les profils de température à x=0.5L et y=0.5H pour les trois fluides différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$. Nous remarquons que tous les profils paraissent équivalents mais une diminution de la température sur ces axes inversement proportionnelle par rapport à la vitesse ce qui explique le refroidissement plus efficace avec une vitesse qui augmente. On constate aussi que l'ajout des nanoparticules de CuO favorise légèrement le transfert de chaleur grâce à l'amélioration de la conductivité thermique du fluide. Par rapport à l'eau pure, le nanofluide (Cu-eau) présente une distribution thermique modérément plus homogène, traduisant une meilleure diffusion de la chaleur vers la sortie du micro canal.



igure IV.17. Les isothermes (eau-CuO) pour différent vitesses d'entrée en (m/s)

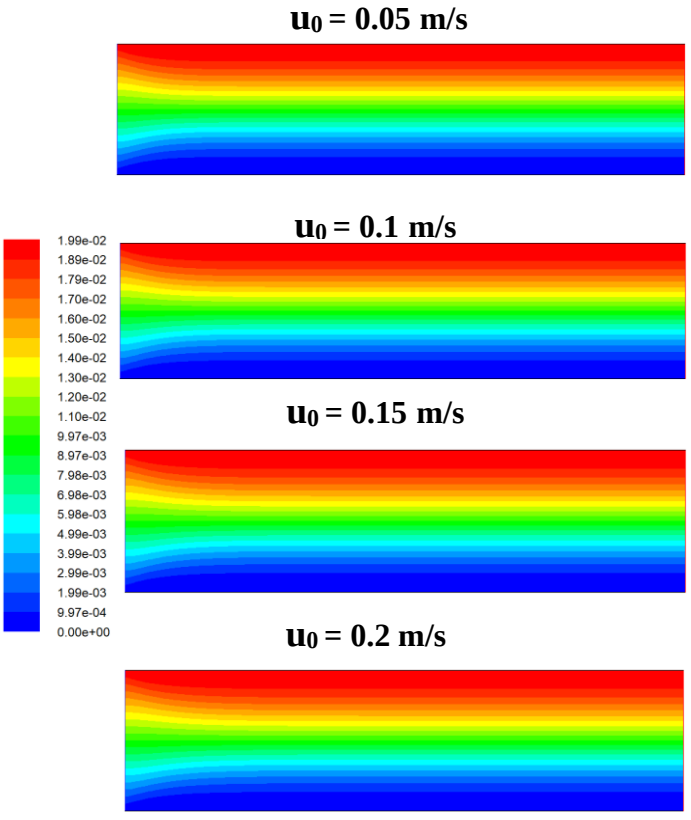


Figure IV.18. Les lignes de courant (eau-CuO) pour différentes vitesses d'entrée en (m/s).

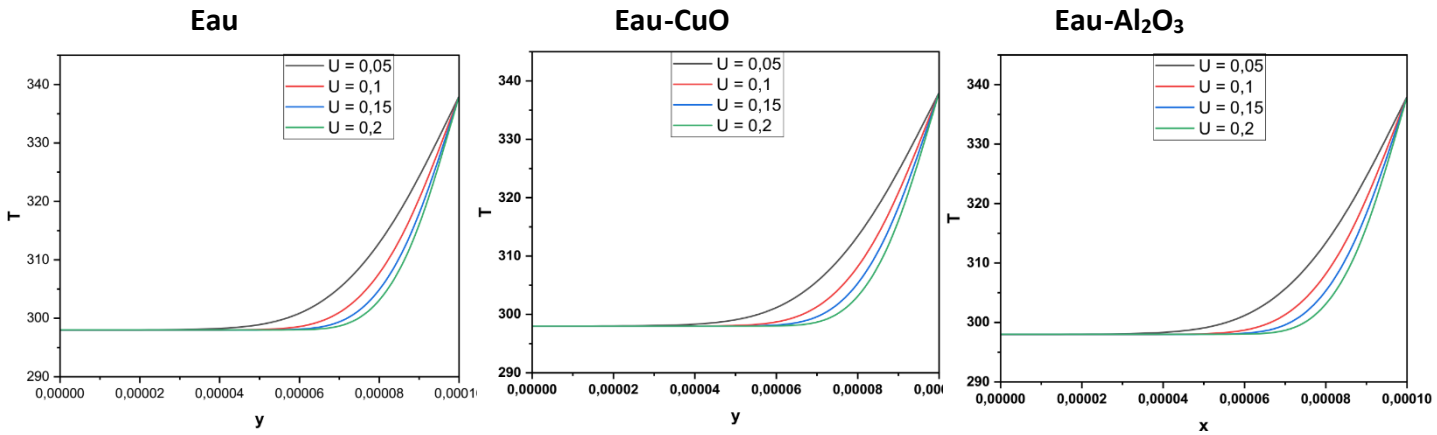


Figure IV.19. Profils de température à x=0.5L pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$

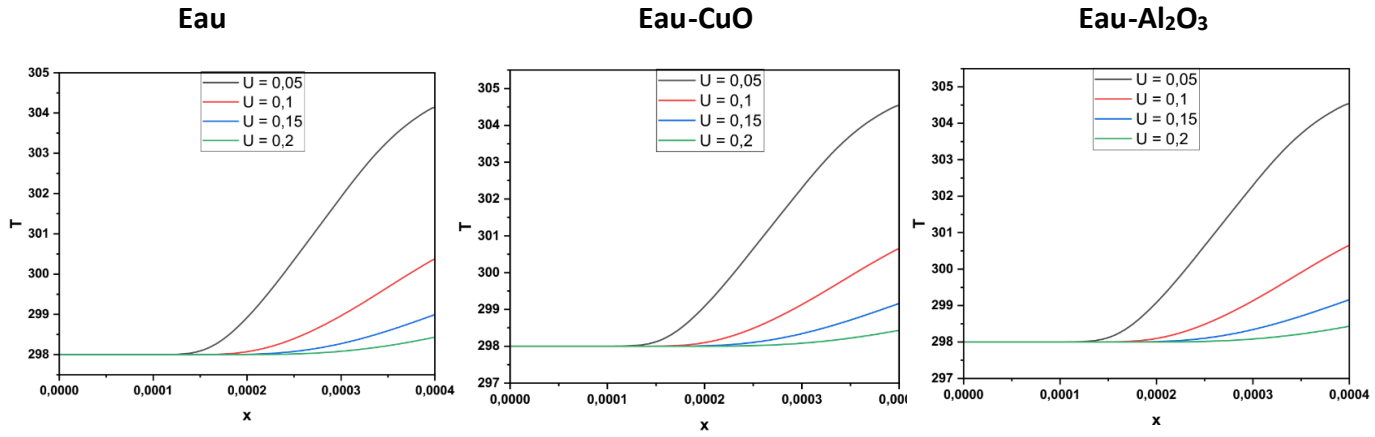


Figure IV.20. Profils de température à y=0.5H pour différentes vitesses en (m/s) à $\varphi = 2\%$

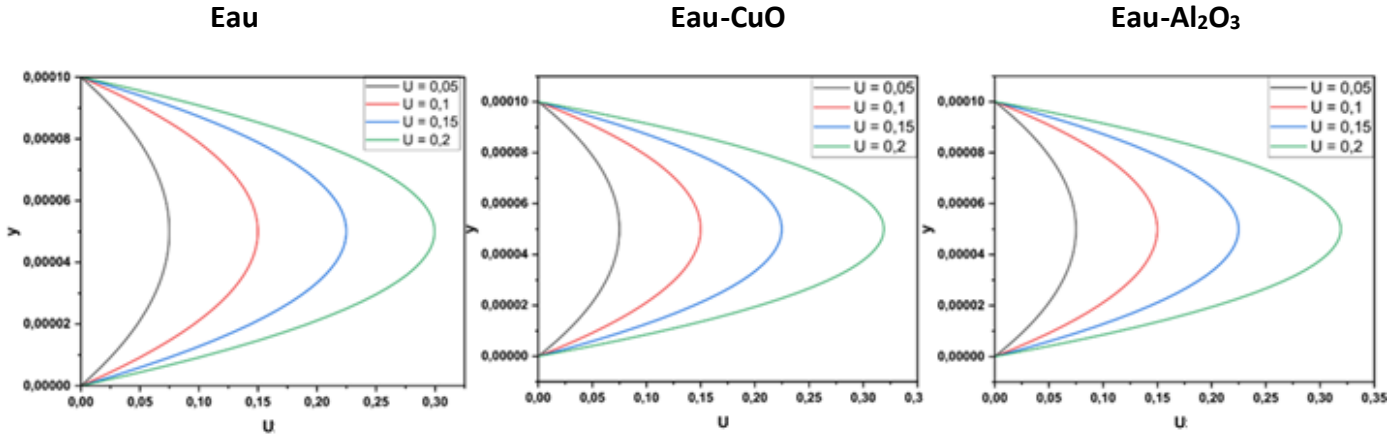


Figure IV.21. Profils de vitesses u à x=0.5L pour différentes vitesses d'entrée en (m/s) à $\varphi = 2\%$

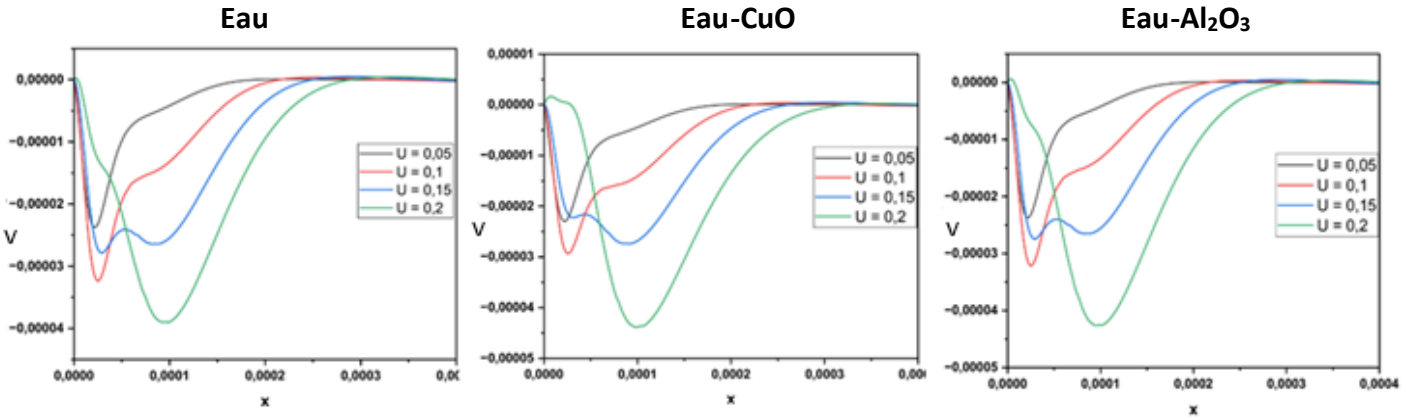


Figure IV.22. Profils de vitesses v à y=0.5H pour différentes vitesses d'entrée en (m/s) à $\varphi = 2\%$

VI.4 Comparaison de Nusselt Moyen

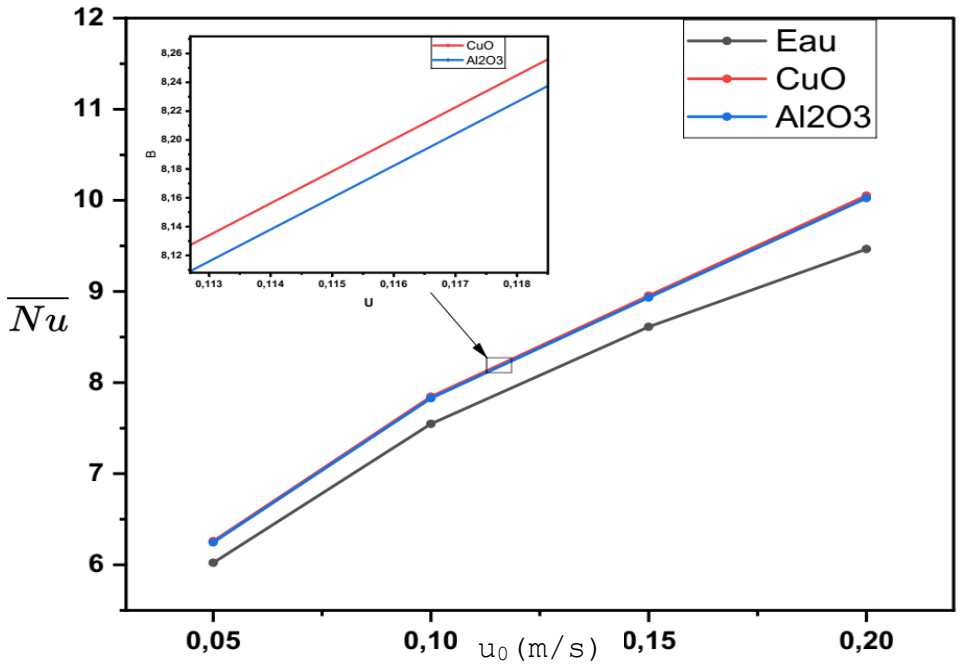


Figure IV.23. Nombres de Nusselt moyen en fonction de la vitesse d'entrée pour différents types de fluides (Eau, Eau-CuO, Eau-Al_2O_3)

Pour les profils de vitesse tracés Profils de vitesses u à x=0.5L et v à y=0.5H pour les trois fluides à différentes vitesses d'entrée en (m/s) à $\varphi = 2\%$ sont présentés sur la figure IV.19 et IV.20. Nous remarquons que tous les profils paraissent équivalents mais leurs valeurs maximales augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'entrée.

L'évolution du nombre de Nusselt moyen (Nu) en fonction de la vitesse d'entrée (u_0) pour les trois fluides (Eau , Cu-eau et Al2O3) est présentée sur la figure IV.23 .

On constate que le nombre de Nusselt augmente d'une façon continue avec l'accroissement de la vitesse d'entré pour les trois fluides étudiés. Cette amélioration s'explique par de la vitesse d'entrée (u_0) pour les trois fluides, qui réduit l'épaisseur de la couche limite thermique, ce qui améliore l'échange thermique et le refroidissement entre la paroi chauffée et le fluide. Par conséquent, le refroidissement des composants électroniques sera plus actif

Conclusion Générale :

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude de refroidissement des composants électroniques par nanofluides à travers des micros canaux. L'objectif principal est de mettre en évidence l'intérêt de ces fluides avancés dans l'amélioration des performances thermiques et dans l'augmentation de la fiabilité des systèmes électroniques. Notre contribution est concentré sur l'analyse de l'effet des paramètres, tels que la variation de la fraction volumique solide (1% ; 2% ; 3%) , le type des nanoparticules (H_2O-Cu et H_2O-Al_2O_3) sur le refroidissement des micro-canaux des composants électroniques .

Les résultats ont montré que les nano-fluides présentent des performances thermiques supérieures à celles de l'eau pure sur l'ensemble des vitesses considérées à travers les valeurs de Nusselt. Cette amélioration est due à l'augmentation de la conductivité thermique du fluide par la présence des nanoparticules qui favorise le transfert de chaleur convectif. On observant que le nano-fluide (Cu-Eau) offre la meilleure efficacité thermique par rapport au (Al2O3) , tandis que les valeurs basses de l'eau pure indiquent une capacité de transfert thermique moins importante.

En conclusion, l'augmentation de la vitesse d'entrée et l'utilisation de nano-fluides contribuent de manière combinée à améliorer le transfert thermique.

Le nano-fluide (Cu-eau) apparait comme le fluide le plus performant parmi les cas étudiés, ce qui montre son efficacité pour renforcer les échanges thermiques et son utilité dans les applications nécessitant un refroidissement performant.

On perspective, l'étude des différentes configurations géométriques installées pour le refroidissement des différentes composantes électroniques serait intéressante ainsi d'étendre l'étude numérique pour un système à trois dimensions

References bibliographiques :

[1] J Yang, X Yang, J Wang, HH Chin and B Sundén (**2022**) Review on Thermal Performance of Nanofluids with and Without Magnetic Fields in Heat Exchange Devices", Front. Energy Res. 10 :822776.

[2] I. C Bang, & S. H Chang,. (**2005**). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3–water nanofluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2407–2419.

[3] M. Sandhya, K. Ramasamy, et al., (**2021**) Ultrasonication: an intensifying tool for preparation of stable nanofluids," Ultrasonics Sonochemistry, 73: 105479,.

[4] A. M.Hussein, K. V., Sharma, R. A. Bakar, & K. Kadirgama, (**2013**). The effect of nanofluid volume concentration on heat transfer and friction factor inside a horizontal tube., Journal of Nanomaterials, art: 859563,

[5] C. Quintero-Quiroz, L. E Botero, D. Zárate-Triviño, , N.Acevedo-Yepes, Saldarriaga Escobar, J., Pérez, V. Z., & Cruz Riano, L. J. **(2020).** *Synthesis and characterization of a silver nanoparticle-containing polymer composite with antimicrobial abilities for application in prosthetic and orthotic devices*. Biomaterials Research, 24, art.13.

[6] Ahmed, A., Baig, H., Sundaram, S., & Mallick, T. K. (**2019**). *Use of Nanofluids in Solar PV/Thermal Systems*. International Journal of Photoenergy, 2019, ID 8039129.

[7] Liu, D., & Garimella, S. V. (**2004**). *Investigation of liquid flow in microchannels*. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 18(1), 65–72

[8] Khanafer, K., Vafai, K., & Lightstone, M. (**2003**). Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(19), 3639–3653.

[9] S.M.Sohel Murshed, C.A.Nieto de Castro, **(2017),** A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling", Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 78, pp. 821-833,.

[10] P. Mangalkar , Dr. V.M.Kriplani, (**2017**), A Review on Heat Transfer Enhancement using Nanofluid for Cooling of Electronic Components, International Journal of Engineering Science and Computing, February, Vol. 7 issue No 2.

[11] G. Colangelo, E. Favale, M. Milanese, A.de Risi, D.Laforgia, (**2017**), Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution, Applied Thermal Engineering Vol. 127, 421-435.

[12] R. Sharma, A. Singh Gill, V. Dhawan (**2016**), Experimental analysis of heat transfer and fluid flow in micro-channel heat sink", International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH), Vol.5(3).

[13] S.E. Ghasemi, A.A. Ranjbar, M.J. Hosseini (**2017**), Thermal and hydrodynamic characteristics of water-based suspensions of Al_2O_3 nanoparticles in a novel minichannel heat sink", J. Mol. Liq . Vol 230, 550-556.

[14] S. M. Sohel Murshed and C. A. Nieto de Castro, (**2018**), Nanoparticles-loaded fluids for cooling modern electronics", AIP Conference Proceedings, id.050015.

[15] A. Behnampour, O. A. Akbari, M. R. Safaei, M. Ghavami, A. Marzban, G. A.S. Shabani, M. zarringhalam, R. Mashayekhi (**2017**), "Analysis of heat transfer and nanofluid fluid flow in microchannels with trapezoidal, rectangular and triangular shaped ribs", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, V.91,15 – 31.

[16] A. Bouhelal, S.Lebbihi, N.Benrachi, A.Smaïli (**2016**), Simulation de la convection naturelle autour d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano-fluide », *CFD & Tech 2016*, CRND-Draria, Alger, 02–03 mai.

[17] N.Charef-K., A. Soudani (**2010**) , Étude numérique des écoulements dans les micro canaux, Mémoire de magistère en physique, Université de Batna,.

[18] Y. A.Cengel, A. J. Ghajar (**2015**). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

[19] Ansys Fluent User's guide, site de Ansys fluent, Ansys Product Help : https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&prodver=24.2&lang=en