

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Simulation numérique de la convection
mixte d'un nano-fluide dans un canal
Vertical.

Préparé par :

Mr AISSA Farouk

Mr LAMOURI Ilyes

Soutenu publiquement le : .. / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. CHAIB Khaled	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. MEKROUSSI Said	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BENFERHAT Slimane	Doctorat En-sciences (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. KARAS Abdelkader	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Dédicace

*À ma très chère mère,
À mon père,
À mes frères et mes sœurs,
À mon ami BENAHMED Abdelillah et BACHA Mohamed
Et à tous qui me sont chers.*

AISSA Farouk

Dédicace

Dédicace

*À ma très chère mère,
À mon père,
À mes frères et mes sœurs,
À mon ami BENAHMED Abdelillah
Et à tous qui me sont chers.*

Lamourí Ilyes

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

*Qu'il nous soit permis d'exprimer notre reconnaissance à notre enseignant et promoteur, **Dr.karas Abdelkader** , pour avoir accepté de diriger ce travail. Nous le remercions également pour la confiance qu'il nous a témoignée. Qu'il veuille trouver ici notre estime, notre gratitude et notre respect, pour son aide précieuse et ses encouragements. Ses qualités humaines et morales nous ont aidées à mener à terme ce travail,*

*Notre profond respect va à notre enseignante, **Dr CHAIB Khaled**, pour avoir accepté de présider le jury et d'apprécier la qualité de notre travail.*

*Nous tenons à remercier **Dr MEKROUSSI Said** et **Dr BENFERHAT Slimane** pour avoir accepté de porter un jugement éclairé et d'examiner notre travail.*

Toute notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de notre mémoire.

Résumé

Résumé

Dans ce présent travail, nous avons étudié la convection mixte lors d'un écoulement laminaire, permanent et stationnaire d'un nano-fluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) à travers un canal vertical à plaques parallèles. Les parois du canal sont maintenues à une température uniforme constante, T_p . Un courant ascendant de nano-fluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) pénètre dans le canal à une température constante relativement faible, T_0 , et une vitesse uniforme, V_0 .

Le problème traité est résolu avec le code (**Fluent 6.3.26**) à l'aide de la méthode des volumes finis, a été utilisée pour discrétiser les équations du modèle mathématique (équation de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie).

Les champs dynamique et thermique sont obtenus pour différentes valeurs de la fraction volumique (0%, 3%, 7% et 9%). Des analyses de l'évolution de température et de la vitesse d'écoulement ainsi que du nombre de Nusselt ont été réalisées.

Ces résultats sont comparés par d'autres résultats mentionnés dans la littérature. Les résultats sont présentés l'influence de ces différents paramètres sur notre écoulement (nano-fluide). La présence de nanoparticule joue un rôle important sur le transfert de chaleur et de masse.

Mots clés :

Convection mixte, transfert de chaleur, nano-fluide, méthode des volumes finis

Abstract

In this present work, we studied mixed convection during a laminar, permanent and stationary flow of a nano-fluid (titanium dioxide TiO₂ + water) through a vertical channel with parallel plates. The walls of the channel are maintained at a constant uniform temperature, T_p . An ascending stream of nanofluid (titanium dioxide TiO₂ + water) enters the channel at a relatively low constant temperature, T_0 , and a uniform velocity, V_0 .

The treated problem is solved with the code (Fluent 6.3.26) using the finite volume method, was used to discretize the equations of the mathematical model (equation of continuity, momentum and energy).

The dynamic and thermal fields are obtained for different values of the volume fraction (0%, 3%, 7% and 9%). Analyzes of the temperature and flow velocity as well as the Nusselt's number were performed.

These results are compared by other results mentioned in the literature. The results are presented on the influence of these different parameters of our flow (nano-fluid). The presence of nanoparticle plays an important role in heat and mass transfer.

Keywords : Mixed convection, heat transfer, nano-fluid, finite volume method.

المخلص

في هذا العمل الحالي، درسنا الحمل الحراري المختلط أثناء التدفق الصفحي والدائم والثابت لسائل نانوي (ثاني أكسيد التيتانيوم + TiO_2 ماء) عبر قناة عمودية بألواح متوازية. يتم الحفاظ على جدران القناة عند درجة حرارة موحدة ثابتة T_p . يدخل تيار صاعد من سائل النانو (ثاني أكسيد التيتانيوم + ماء) القناة عند درجة حرارة ثابتة منخفضة نسبيًا، T_0 ، وسرعة موحدة، V_0 .

تم حل المشكلة المعالجة بالكود (بطلاقة 6.3.26) باستخدام طريقة الحجم المحدود، وتم استخدامها لتقدير معادلات النموذج الرياضي (معادلة الاستمرارية والزخم والطاقة).

يتم الحصول على الحقول الديناميكية والحرارية لقيم مختلفة لكسر الحجم (0%، 3%، 7%، 9%). تم إجراء تحليلات لدرجة الحرارة وسرعة التدفق وكذلك عدد نسلت.

تتم مقارنة هذه النتائج بالنتائج الأخرى المذكورة في الأدبيات. يتم عرض النتائج على تأثير هذه المعلمات المختلفة على تدفقنا (سائل النانو). يلعب وجود الجسيمات النانوية دورًا مهمًا في انتقال الحرارة والكتلة. الجسيمات النانوية دورًا مهمًا في انتقال الحرارة والكتلة.

الكلمات المفتاحية:

الحمل الحراري المختلط، نقل الحرارة، سائل النانو، طريقة الحجم المحدود

Sommaire

Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	III
Résumé	V
Abstract	VI
الملخص	VII
Sommaire	IX
Liste des figures et des tableaux	XIII
Nomenclature	XVIII
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur le transfert de chaleur et les nano-fluides	
I.1 Introduction	04
I.2 Définition de nano fluide	05
I.3 Types de nanoparticules	05
I.4 Production des nano-fluides et nanoparticules	06
I.5 Propriétés thermo-physiques des nano-fluides	08
I.5.1 Viscosité dynamique des nano-fluides	08
I.5.2 Masse volumique	09
I.5.3 Fraction volumique	10
I.5.4 Chaleur spécifique	10
I.5.5 Conductivité thermique	10
I.6 Applications de nano-fluides	12
I.7 Avantages et inconvénients des nano-fluides	12
I.8 Notions sur la convection	13
I.8.1 Définition	13
I.8.2 Types de convection	13
I.8.2.1 Convection naturelle	13
I.8.2.2 Convection forcée	14
I.8.3 Convection mixte	14
I.9 Domaines d’application du transfert de chaleur par convection	15
I.10 Définition de la couche limite	15
a. Concept de couche limite dynamique	16
b. Concept de la couche limite thermique	16

I.11 Conclusion	17
-----------------------	----

Chapitre II : Synthèse bibliographique

II.1 Introduction	19
II.2 Synthèse bibliographique	20
II.3 Conclusion	34

Chapitre III : Formation mathématique et présentation de logiciel

III.1 Introduction	36
III.2 Description du problème	37
III.3 Modèle mathématique	38
III.4 Hypothèses simplificatrices	38
III.5 Equations gouvernantes	39
III.6 Conditions aux limites	39
III.6.1 Le nombre de Reynolds	40
III.6.2 Le nombre de Nuselt	40
III.7 Principe du calcul numérique	40
III.8 Rappel sur la méthode des volumes finis (MVF)	41
III.9 Les différentes étapes de l'approche numérique	41
III.10 Présentation du logiciel Gambit	42
III.11 Maillage	42
a) Maillage structuré (Quadra/hexa)	44
b) Maillage non structuré (Tri/Tétra)	44
c) Maillage hybride	44
III.12 Conditions aux limites et définition du domaine	45
III.13 Présentation du code FLUENT	45
III.14 Conclusion	51

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1 Introduction	55
IV.2 L'effet du maillage sur les solutions numérique	55
IV.3 Validation du code de calcul	55
IV.4 Analyse des résultats	57
IV.5 Résultats et discussion	57
IV.5.1 Effet de la fraction volumique du solide.....	57
IV.5.2 Comportement dynamique et thermique de nano-fluide dans un canal....	63
IV.5.3 Effet du nombre de Reynolds	64

IV.5.4 Effet du nombre de Grashof (Gr)	66
IV.6 Conclusion	67
Conclusion générale	69
Annexes	71
Référence bibliographique	75

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le transfert de chaleur et les nano-fluides

Figure I-1	Nano-fluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + Nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 2nm (Ribiero Joao-Paulo , 2009).....	05
Figure I-2	Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone KHENTOUL MOUSSA, 2016).....	06
Figure I-3	Les nanoparticules dans un tube (M. Akbari ,2008)	06
Figure I-4	Simulation du phénomène de convection par la circulation de l'air autour d'une ampoule allumée. (YAICHE Rafik et al ,2013).....	13
Figure I-5	Schéma représentatif de la convection naturelle (R. Leleu, 21992).....	13
Figure I-6	Schéma représentatif de la convection forcée (R. Leleu,1992).....	14
Figure I-7	Représentation schématique des couches limites dynamique et thermique se développant sur un cylindre (R. Leleu, 1992).....	15
Figure I-8	Représentation d'une couche limite dynamique.....	16
Figure I-9	Représentation d'une couche limite thermique	16

Chapitre II : Synthèse bibliographique

Figure II-1	Modèle physique et les coordonnées du système (Malvandi et al. 2005).....	20
Figure II-2	Géométrie considérée (Y. Harnane et al. 2008).....	21
Figure II-3	Modèle physique et système de coordonnées de (Rana et al. 2009).....	22
Figure II-4	Modèle physique et système de coordonnées de (I.Pishkar et B.Ghasemi 2010).....	22
Figure II-5	Schéma d'une cavité carrée avec des orifices d'entrée et de sortie. (Mina Shahi et al 2010)....	23
Figure II-6	Schéma d'une cavité carrée partiellement chauffée. (A. Mansour et R.A. mohamed 2010)....	24
Figure II-7	Schéma d'une cavité carrée avec une paroi supérieur mobile.. (Farhad Talebi et al 2010).....	25
Figure II-8	Schéma d'une conduite soumise à un flux de chaleur. (M. Rostamani et al 2010).....	25
Figure II-9	Schéma d'une cavité carrée avec un couvercle mobile. (M. Rostamani et al 2010).....	26
Figure II-10	Cavité triangulaire avec une paroi mobile. (B. Ghasemi et S.M. Aminossadati 2010).....	27
Figure II-11	Schéma d'une cavité carrée avec une source de chaleur sur la paroi inferieur. (Saeed Mazrouei Sebdania et al 2011).....	28
Figure II-12	Schéma d'un canal vertical rempli de nano-fluides. (Hang Xu et Ioan Pop 2012).....	28
Figure II-13	Modèle d'écoulement et le système de cordonnées. (Hang Xu et Ioan Pop 2012).....	29
Figure II-14	La géométrie du problème. (S. Das et al. 2016).....	30
Figure II-15	La géométrie du problème. (E.Belahmadi et al. 2016).....	31
Figure II-16	Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles. (M. Benzema et al. 2017).....	32
Figure II-17	Diagramme schématique du modèle physique. (Yuan Ma et al. 2019).....	33
Figure II-18	Diagramme schématique du modèle physique. (Yuan Ma et al. 2019).....	34

Liste des figures

Chapitre III : Formation mathématique et présentation de logiciel

Figure III-1	Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites.....	37
Figure III-2	Le principe du calcul numérique. (SANDALI,2014).....	40
Figure III-3	Lancement du Gambit.....	42
Figure III-4	Création de la géométrie.....	43
Figure III-5	Maillage surfacique.....	43
Figure III-6	Schéma des conditions aux limites.....	45
Figure III-7	Type de résolution.....	46
Figure III-8	La lecture de la grille.....	47
Figure III-9	Fenêtre solveur.....	48
Figure III-10	Fenêtre de modèle visqueux.....	48
Figure III-11	Fenêtre de Matériaux.....	49
Figure III-12	Valeurs des conditions aux limites.....	49
Figure III-13	Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.....	50
Figure III-14	Fenêtre de solution initialisation.....	50
Figure III-15	Choix du nombre des itérations.....	51
Figure III-16	Evolution des résidus des équations de continuité, énergie et quantité de mouvement pour la convection mixte pour $Re=300$ et $Ri=1.77$	51

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Figure IV-1	Comparaison entre nos résultats numériques et ceux de (Desrayaud and Lauriat (2009), (a) Profils de température et (b) Profils de vitesse, en fonction de y , pour $Re = 300$ et $Gr=1.59.10^5$	55
Figure IV-2	Différentes sections choisies.....	56
Figure IV-3	Effet de différentes fractions volumiques solides (ϕ) sur la pression dynamique à la sortie du canal, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59*10^5$	57
Figure IV-4	Contour de la vitesse totale pour différents valeurs de fraction volumique, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59*10^5$	57
Figure IV-5	Effet de différentes fractions volumiques solides (ϕ) sur la vitesse totale suivant Y à la sortie du canal, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59*10^5$	58
Figure IV-6	Contour de température totale pour différents valeurs de fraction Volumique	59
Figure IV-7	Effet de différentes fractions volumiques solides (ϕ) sur la température totale à la sortie du canal, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59*10^5$	60
Figure IV-8	Effet de différentes fractions volumiques solides (ϕ) sur la température totale suivant l'axe X ($x=0.015$) à $Re = 300$ et $Gr = 1,59*10^5$	60
Figure IV-9	Profil du nombre de Nusselt pour différentes valeurs de ϕ , à $Gr = 1.59 \times 10^5$ et $Re = 300$	61
Figure IV-10	Profil de la vitesse résultante suivant X pour $\phi = 7\%$, $Re=300$, $Gr= 1.59*10^5$ et $Ri=1.77$	62
Figure IV-11	Profil de la température totale suivant X pour $\phi = 7\%$, $Re=300$, $Gr= 1.59*10^5$ et $Ri=1.77$	63

Liste des figures

Figure IV-12	Effet de différents nombres de Reynolds (Re) sur la température totale, à Gr = $1,59 \times 10^5$ et $\phi = 9\%$	64
Figure IV-13	Effet de différents nombres de Reynolds (Re) sur le nombre de Nusselt (Nu), à Gr = $1,59 \times 10^5$ et $\phi = 9\%$	64
Figure IV-14	Effet de différents nombres de Grashof (Gr) sur la température totale, à Re = 1000 et $\phi = 3\%$	66

Liste des tableaux

Tableau I.1	Avantages et inconvénients des nano-fluides.....	12
Tableau III.1	Dimensions du capteur étudié.....	37
Tableau III-2	Propriétés des Matériaux utilisés.....	38
Tableau III-3	Les propriétés physiques de fluide de base utilisée l'eau (25°C).....	38
Tableau III-4	Les propriétés physiques du nano-fluide (dioxyde de titane TiO ₂ + eau) avec différentes fractions volumiques.....	38
Tableau IV.1	Étude de l'indépendance du maillage pour un nano-fluide (dioxyde de titane TiO ₂ + eau), avec A = 50, $\phi = 3\%$, Gr = 1.59×10^5 et Re = 300.....	54

Nomenclature

Nomenclature

Nomenclature

C_p	Chaleur spécifique à pression constante	[J/kg.K]
F_i	Force suivant la direction i par unité de volume	[N.m ⁻³]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
w	Dimensions d'ailettes	[m]
i, j	Indices	[-]
K	Energie cinétique turbulent	[m ² /s ²]
δ	épaisseur des ailettes	[m]
L	Longueur du canal	[m]
D_H	diamètre hydraulique	[m]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
P_0	Pression atmosphérique	[Pa]
P	Pression	[Pa]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Gr	Nombre de Grashof	[-]
Re	: Nombre de Reynolds	[-]
Ri	: Nombre de Richardson	[-]
T_0	Température ambiante	[K]
θ	Température adimensionnelle	[-]
t	Temps dimensionnel	[s]
u, v	: Composantes de la vitesse dimensionnelle	[m.s ⁻¹]
U	la vitesse de l'écoulement	[m.s ⁻¹]
α	Diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]
β	Coefficient d'expansion	[K ⁻¹]
φ	Fraction volumique	[-]

Nomenclature

μ :	<i>Viscosité dynamique</i>	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$
ν	<i>Viscosité cinématique</i>	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	<i>Masse volumique</i>	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ΔT	<i>Différence de température</i>	$[\text{K}]$
Γ	<i>Coefficient de diffusivité</i>	$[-]$

Introduction Générale

Introduction Générale

Les transferts de chaleur constituent la base de nombreux processus industriels qui sont présents dans notre vie quotidienne. L'intensification de ces échanges et l'amélioration du rendement sont devenus aujourd'hui une problématique majeure dans le monde industriel, des organismes de réglementation, mais aussi de la société dans son ensemble, qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques et qui se soucie de l'avenir en matière énergétique. (SAHBI.M.O et al ,2017)

L'amélioration de transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieurs travaux et pour se faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais théorique, numérique et expérimentaux pourtant sur la description des phénomènes gérant la convection. L'intérêt de telles études réside dans son implication dans de nombreuses applications industrielles. (Abbou Djamil et al, 2019)

Les efforts visant à améliorer les échangeurs thermiques dans de nombreux secteurs industriels (automobile, électronique...) nécessitent l'intensification des transferts de chaleur par convection. Les améliorations dites « passives », au niveau des surfaces d'échange, sont une voie déjà largement explorée et atteignent leurs limites. De nouvelles voies d'optimisation doivent donc être étudiées. L'une d'elles consiste à utiliser de nouveaux fluides capables d'accroître les transferts thermiques : c'est le cas des nano-fluides. (Aggoun Zahir et al, 2019)

Les nano-fluides sont alors l'un des fruits d'une richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières telle que leur importante conductivité thermique, les nano-fluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par rapport aux simples caloporteurs (l'eau, l'huile ou l'éthylène-glycol). Les études menées dans cette nouvelle direction ont fourni une riche bibliographie, mais très variée : bien qu'en majorité ils sont assez positifs. Cette amélioration du transfert de chaleur fait donc des nano-fluides une nouvelle technologie prometteuse dans le cadre des transferts thermiques, permettant d'améliorer les performances de divers échangeurs de chaleurs. (S.U.S. Choi, 1995)

Les applications potentielles des nano-fluides sont multiples et très importantes dans plusieurs domaines (refroidissement électrique, climatisation et froid, aéronautique et spatial,...), et pourraient constituer sous certaines conditions un débouché prometteur des nanosciences dans le domaine de l'énergie.

Dans le présent travail, nous avons considéré le cas de la convection mixte dans un canal vertical en présence d'un nano-fluide. Notre objectif est de comprendre l'effet de la fraction volumique sur le mécanisme de la convection. On analysera en particulier l'influence de certains paramètres sur les champs dynamiques et thermiques ainsi que sur la température et le nombre de Nusselt.

Le présent mémoire comporte en plus d'une Introduction générale quatre chapitres essentiels, une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur le transfert de chaleur et les nano-fluides.

Le deuxième chapitre consiste une synthèse bibliographique des travaux théoriques, expérimentaux et numériques ayant traité la convection mixte dans les canaux.

Le troisième chapitre contient La configuration étudiée ainsi que le modèle mathématique adopté, et une présentation du logiciel (Gambit 2.3.16) ainsi que, celle du code de calcul (Fluent 6.3.26) que nous avons utilisé pour la résolution numérique du problème. La procédure de résolution est aussi présentée.

Le quatrième et dernier chapitre, est consacré à l'interprétation des différents résultats des simulations.

On a terminé par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus durant cette étude.

Chapitre I :

Généralités sur le transfert de chaleur
et les nano-fluides

I.1 Introduction :

Le transfert de chaleur par convection peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. La conductivité thermique d'un liquide non métallique étant très faible, il faut trouver un moyen de l'augmenter artificiellement. Or, quoi de plus simple que d'ajouter des particules d'un matériau doté d'une bonne conductivité thermique du mélange (Abbou Djamil et al, 2019).

Les efforts visant à améliorer les échangeurs thermiques dans de nombreux secteurs industriels (automobile, électronique...) nécessitent l'intensification des transferts de chaleur par convection. Les améliorations dites « passives », au niveau des surfaces d'échange, sont une voie déjà largement explorée et atteignent leurs limites. De nouvelles voies d'optimisation doivent donc être étudiées. L'une d'elles consiste à utiliser de nouveaux fluides capables d'accroître les transferts thermiques : c'est le cas des nano-fluides.

Les nano-fluides sont une nouvelle catégorie de fluide qui a été introduite pour la première fois par (S.U.S. Choi, J.A , 1995). En effet, il s'agit de disperser des particules de taille nanométrique dans les fluides conventionnels couramment utilisés, dans le but d'améliorer les propriétés thermiques de ces derniers.

Les nano-fluides sont généralement classés en fonction de la nature des nanoparticules qui les composent en trois catégories, à savoir, métalliques, oxydes métalliques et non-métalliques.

Les nano-fluides trouvent leurs applications dans plusieurs secteurs, notamment domestique, ingénierie et biomédical. (S.-E. OUYAHIA et al, 2017).

I.2 Définition de nano fluide :

Les nano-fluides sont des solutions colloïdales composées des particules de taille nanométrique (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle un liquide 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 (EG) ne disposent que

d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins, avec les nano-fluides l'idée est alors d'insérer au sien du fluide de base des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange (Ribiero Joao-Paulo , 2009).

Parmi les nanoparticules utilisées pour obtenir les nano-fluides on peut citer : (Glades Bachir et Benhadid , 2010).

- **Métalliques** : le cuivre (Cu), l'aluminium (Al), l'or (Au), l'argent (Ag).
- **Oxydes** : l'oxyde de cuivre (Cu O), l'oxyde de l'aluminium (Al₂ O₃) le dioxyde de titane (TiO₂). (BAZIZI Rachida et al , 2018)

Le choix des liquides de base est primordial pour un nano-fluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction d la nature de nanoparticule, les solvants les plus utiliser sont :

- L'eau -L'éthylène glycol- les huiles-toluène.

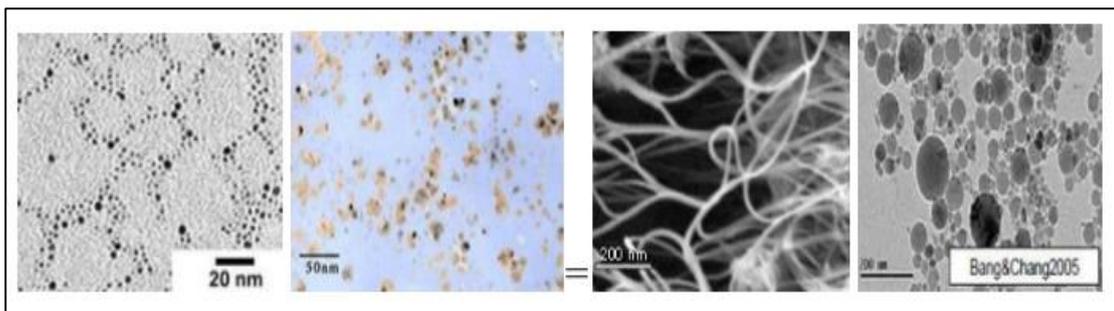


Figure I- 1 : Nano-fluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + Nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 2nm (Ribiero Joao-Paulo , 2009).

I.3 Types de nanoparticules :

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées. D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (figure I.2) :

Les nanoparticules sphériques : Pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (l'aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes (oxyde d'aluminium Al₂O₃, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO₂...).

Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , Nanotube de silicium.) (Ould Amer Nassira et al ,2018).

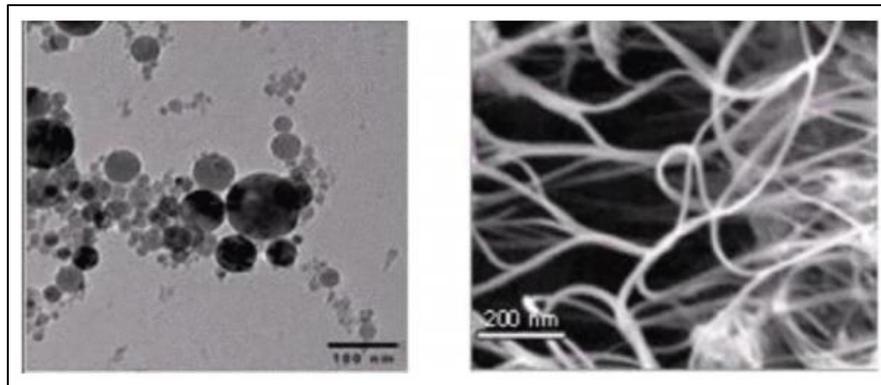


Figure I- 2 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone KHENTOUL MOUSSA, 2016).

I.4 Production des nano-fluides et nanoparticules :

La fabrication des nanoparticules est une industrie nécessitant une technologie très précise, vu la taille et les différentes formes exigées par les expérimentateurs pour avoir plus d'études de cas, et la nécessité de certains traitements chimiques de surface pour les maintenir en suspension.

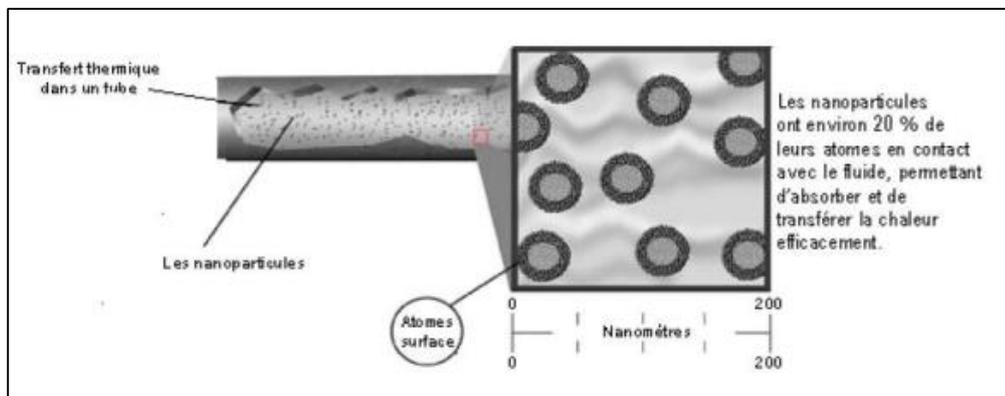


Figure I- 3 : Les nanoparticules dans un tube (M. Akbari ,2008).

Tout en assurant que la suspension est stable, l'agglomération des nanoparticules est minime, et qu'elles n'entrent pas en échange chimique avec le fluide de base, la préparation des nano-fluides peut se faire par l'une des méthodes suivantes (Yaiche Rafik, 2013) :

❖ **La méthode à une seule étape :**

Basée sur la vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide. Dans cette méthode, la formation des nanoparticules est combinée avec la formation du nano-fluide. Le processus en une étape est principalement employé avec les particules fortement réactives qui peuvent changer la composition ou peuvent se former à l'extérieur du fluide de base (Aggoun Zahir et al , 2019).

❖ **La méthode à deux étapes :**

Elle consiste d'abord en la fabrication d'une nanopoudre sèche, puis le mélange et la dispersion de celle-ci dans le liquide. Pour cette méthode, les nanoparticules ont été déjà préparées puis mélangées au fluide de base. L'expérience a prouvé qu'une fois que les nanoparticules sont produites, elles tendent à s'agréger même dans un environnement inerte aussi bien sous la forme de poudre ou dans des suspensions. Un agent tensio-actif est dissous dans le fluide de base afin d'empêcher l'agrégation des particules nouvellement dissoutes. En outre, une méthode mécanique par un moulage, scorification, ultrasonication et vibration est appliqué au nano-fluide nouvellement formé pour empêcher l'agrégation. L'avantage principal du processus à deux étapes est que des nanoparticules peuvent être produites séparément par une méthode industrielle qui permet leur production massive et peu coûteuse. Le défi du processus est dans le transport, le mélange, les procédés de dispersion, et la production d'une suspension homogène des nanoparticules fins qui n'agrégent pas. (Abbou Djamil et al, 2019).

I.5 Propriétés thermo-physiques des nano-fluides :

De nombreuses études ont été menées afin de mesurer, mais aussi d'expliquer et de prédire l'augmentation de la conductivité thermique des nano-fluides.

Différentes méthodes de mesure de conductivité thermique ont été employées, la plus courante reste la méthode utilisant une file chaude en régime transitoire. Les méthodes stationnaires utilisant une différence de température entre deux plaques ou deux cylindres et les méthodes optiques basée sur la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température (Fohanno Stéphane et al, 2012).

I.5.1 Viscosité dynamique des nano-fluides :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des

nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nano-fluide, mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nano-fluides (Salazar G ,2006).

❖ **Modèle d'Einstein :**

La viscosité dynamique d'un nano-fluide est donnée par Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides, est la suivante (Fohanno Stéphane,2012) :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5 * \varphi) \quad (I.1)$$

Où :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano-fluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\varphi = 0.03$.

❖ **Modèle de Brinkman (1952) :**

Brinkman (1952) a étudié la formule d'Einstein pour avoir la formule suivante :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (I.2)$$

Remarque : pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein.

❖ **Modèle de Graham :**

Graham (1981) a proposé une formule généralisée qui tend vers le modèle d'Einstein pour des concentrations volumiques très faibles :

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2.5\varphi + 4.5\varphi^2) \left[\frac{1}{\left(\frac{h}{d_{nb}}\right) \left(2 + \frac{h}{d_{nb}}\right) \left(1 + \frac{h}{d_{nb}}\right)} \right] \quad (I.3)$$

Où d_{nb} et h sont respectivement le rayon de la particule (m) et la distance entre les particules (m).

I.5.2 Masse volumique :

La masse volumique des nano-fluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules.

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique φ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange (Gladés Bachir , 2010).

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V} \right) = \frac{m_{fb} + m_{np}}{V_{fb} + V_{np}} = \frac{\rho_{fb} V_{fb} + \rho_{np} V_{np}}{V_{fb} + V_{np}} \quad (I.4)$$

I.5.3 Fraction volumique :

La fraction volumique et le rapport entre le volume de solide (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base) sa valeur est variée entre 0 et 1 (S.El Habib ,2013) :

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (I.5)$$

V_s : Volume de particule solide (m^3).

V_f : Volume du fluide de base (m^3).

I.5.4 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique, notée C_p (J/kg.K), est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on peut citer les deux modèles suivants :

Modèle du Pak et Cho (Gladés Bachir, 2010): le modèle du Pak et Cho basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène qui est défini par la formule suivante :

$$c_{p,nf} = \varphi(c_p)_{np} + (1-\varphi)(c_p)_{fb} \quad (I.6)$$

Modèle de Xuan et Roetzel (Gladés Bachir, 2010) : ils ont travaillé avec la formule ci-dessous :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_{fb} + \varphi(\rho c_p)_{np} \quad (I.7)$$

$(c_p)_{nf}$, $(\rho c_p)_{fb}$ et (c_p) Désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano-fluide, du fluide de base et des nanoparticules.

I.5.5 Conductivité thermique :

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur, elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température.

Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer, sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions. Nous présenterons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nano-fluides.

❖ Modèle de Maxwell (1873) :

Le modèle de maxwell est valable uniquement dans le cas des nano-fluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules sphériques.

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\varphi k_f}{k_s + 2k_f + (k_s - k_f)\varphi} \quad (I.8)$$

k_{nf} : La conductivité thermique du nano-fluide.

k_f : La conductivité thermique de fluide de base.

k_s : La conductivité thermique des particules solides.

Modèle de Hamilton et Grosseur (1962) :

Puisque le modèle de Maxwell est valable seulement pour les nano-fluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, le modèle de Hamilton et Grosseur a été développé pour le calcul de la conductivité thermique du nano-fluide quel que soit la forme des nanoparticules, et ça en introduisant le facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ).

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f + (n-1)(k_s - k_f)\psi k_f}{k_s + (n-1)k_f + (k_s - k_f)\psi} \quad (I.9)$$

Avec “ n ” le facteur de forme $=3/\psi$. ψ étant la sphéricité de la particule.

❖ **Modèle de Bruggeman :**

Le modèle de Bruggeman complète celui de Maxwell pour des concentrations volumiques relativement élevées.

$$\varphi \left(\frac{k_{np} - k_{nf}}{k_{np} + 2k_{nf}} \right) + (1 - \varphi) \left(\frac{k_{fb} - k_{nf}}{k_{fb} + 2k_{nf}} \right) = 0 \quad (I.10)$$

I.6 Applications de nano-fluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'application pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques, agent de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électro mouillage pour lentilles liquides), et de marquage des cellules ou de contrefaçon avec les nanoparticules fonctionnalisées.

En thermique, les nano-fluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc.

Les nano-fluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des systèmes micro électromécanique (Ribiero Joao-Paulo, 2009).

Autres applications :

- ✓ L'échangeur de chaleur.
- ✓ Le refroidissement d'élément électronique.

- ✓ Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs.
- ✓ Aéronautique et spatial.
- ✓ Refroidissement des systèmes nucléaires.
- ✓ Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).

I.7 Avantages et inconvénients des nano-fluides :

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des nano-fluides.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.	Difficultés dans le processus de production.
Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement Brownien des particules.	Viscosité supérieure, chaleur spécifique basse.
Particules réduites de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, favorisant ainsi la minimisation du système.	Le coût élevé des nano-fluides.

I.8 Notions sur la convection :

I.8.1 Définition :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

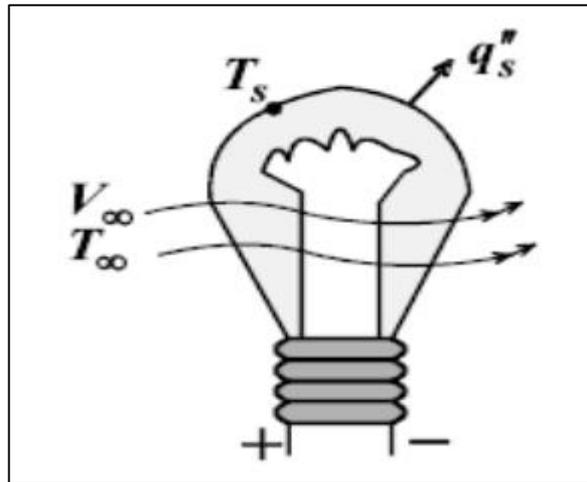


Figure I- 4 : Simulation du phénomène de convection par la circulation de l'air autour d'une ampoule allumée. (YAICHE Rafik et al ,2013).

I.8.2 Types de convection :

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection naturelle, convection forcée et convection mixte.

I.8.2.1 Convection naturelle :

La convection naturelle de la chaleur est utilisée pour réaliser, sans apport d'énergie motrice, le refroidissement d'un corps chaud. Le fluide ambiant qui baigne celui-ci se met progressivement en mouvement sous l'effet des différences de densité créées d'un point à l'autre par l'augmentation de température en présence du champ de gravité.



Figure I- 5 : Schéma représentatif de la convection naturelle (R. Leleu, 1992).

I.8.2.2 Convection forcée :

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique tel que la pompe, ventilateur. Etc. indépendamment des phénomènes thermiques

c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.

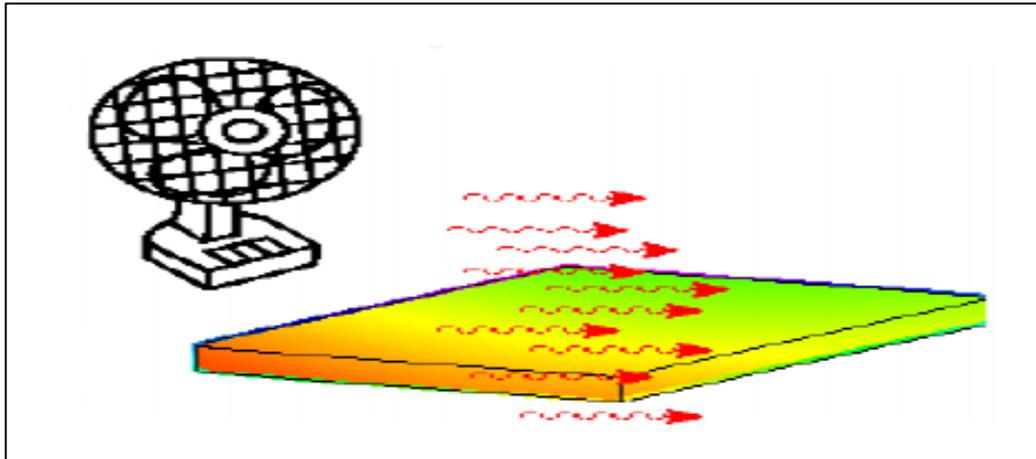


Figure I- 6 : Schéma représentatif de la convection forcée (R. Leleu,1992).

I.8.3 Convection mixte :

Dans l'étude de la convection forcée, on a ignoré les effets de la gravité. En convection naturelle, on ne s'est intéressé qu'à eux. Il existe pourtant un grand nombre de situations intermédiaires où les mécanismes de la convection forcée et de la convection libre coexistent avec des ordres de grandeur comparables : nous sommes là dans le véritable cas général de la convection, que l'on a préféré baptiser plus élégamment "convection mixte". Parmi les exemples de cette mixité, on peut citer : les écoulements lents en canalisations (comme dans les radiateurs à eau) ou le long d'une paroi, les jets an isothermes (chauffage ou climatisation des locaux, panaches de fumée ...), les écoulements atmosphériques et les courants marins (qui sont importants pour les questions de climatologie et de pollution), et plus généralement beaucoup d'écoulements fortement an isothermes (Belmihoub Zohir et al ,2017).

Mais un aspect nouveau fait ici son apparition : les deux mécanismes vont s'aider ou se contrarier selon le sens relatif du mouvement forcé par rapport au mouvement gravitaire, qui jouera donc un rôle essentiel. Si les effets de la pesanteur s'opposent au mouvement forcé, l'écoulement est freiné, le transfert thermique a tendance à diminuer et on parle de convection mixte "contrariée". Si l'écoulement forcé est de même sens que l'écoulement libre (cas de la plaque verticale chauffée, dans un fluide lui-même en mouvement ascendant) il se produit une amplification des transferts par rapport à la convection forcée seule et on parle alors de convection mixte "aidée". Enfin, l'écoulement forcé peut être

perpendiculaire à la direction des forces de pesanteur (c'est à dire horizontal). En général on observe là aussi une amélioration des échanges thermiques. (MEKHNACHE Riadh et al ; 2017).

I.9 Domaines d'application du transfert de chaleur par convection :

Les domaines d'applications des transferts de chaleur par convection sont variés et a différentes échelles spatiales. Aux grandes échelles, par exemples, on peut citer la prédiction météorologique, le climat et la circulation océanique. A plus petites échelles cela concerne de nombreuses applications industrielles comme le refroidissement dans les centrales nucléaires, des aubages de turbine ou des microprocesseurs, le dimensionnement des échangeurs de chaleur, le dégivrage des entrées d'air de réacteur, des applications domestiques comme le confort thermique les déperditions d'un double vitrage (A.Giovannani ,1995).

I.10 Définition de la couche limite :

Il s'agit de cette mince couche de fluide qui se forme sur la surface d'un corps solide lorsque ce dernier entre en contact avec un fluide visqueux en déplacement (écoulement), elle peut être de nature dynamique et thermique.

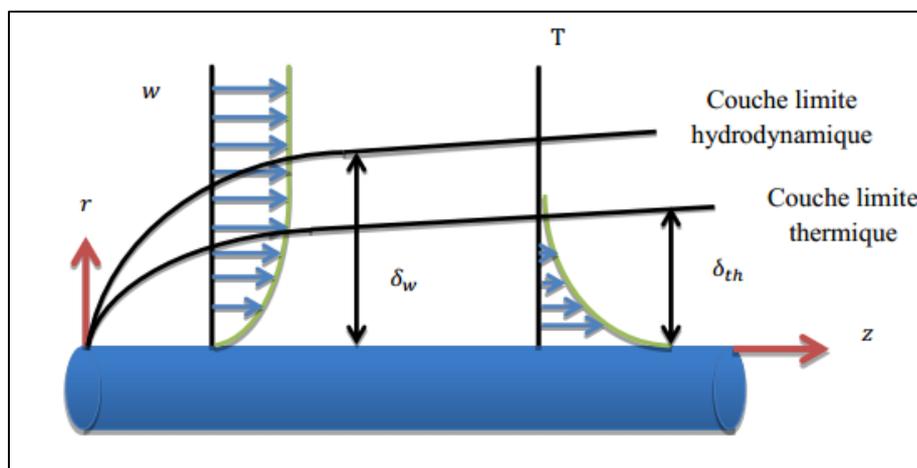


Figure I- 7 : Représentation schématique des couches limites dynamique et thermique se développant sur un cylindre (R. Leleu, 1992).

a. Concept de couche limite dynamique :

Une des caractéristiques principales d'un fluide est la viscosité. Elle varie avec la température et ne s'annule jamais à la paroi. La couche limite est la zone de fluide contiguë à la paroi dans laquelle se produit l'accommodation entre la vitesse nulle en paroi

et la pleine vitesse local du fluide libre. Les propriétés de l'écoulement qui dépendent de cette couche limite sont (Les forces de frottement, Transfer thermique).

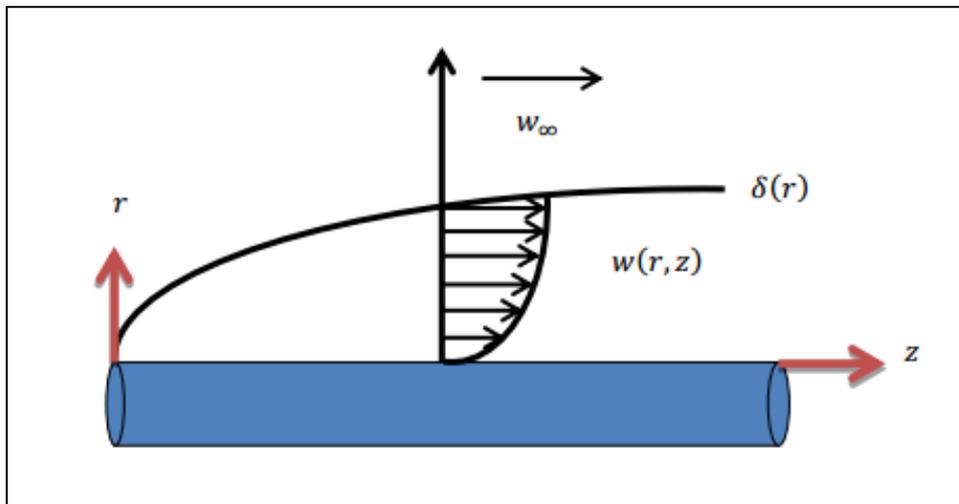


Figure I- 8 : Représentation d'une couche limite dynamique.

b. Concept de la couche limite thermique :

Lorsqu' un fluide de température, s'écoule sur une paroi à la température des échanges thermiques s'établissent. Les particules échangent de la chaleur de proche en proche avec leurs voisins et un gradient de température se forme.

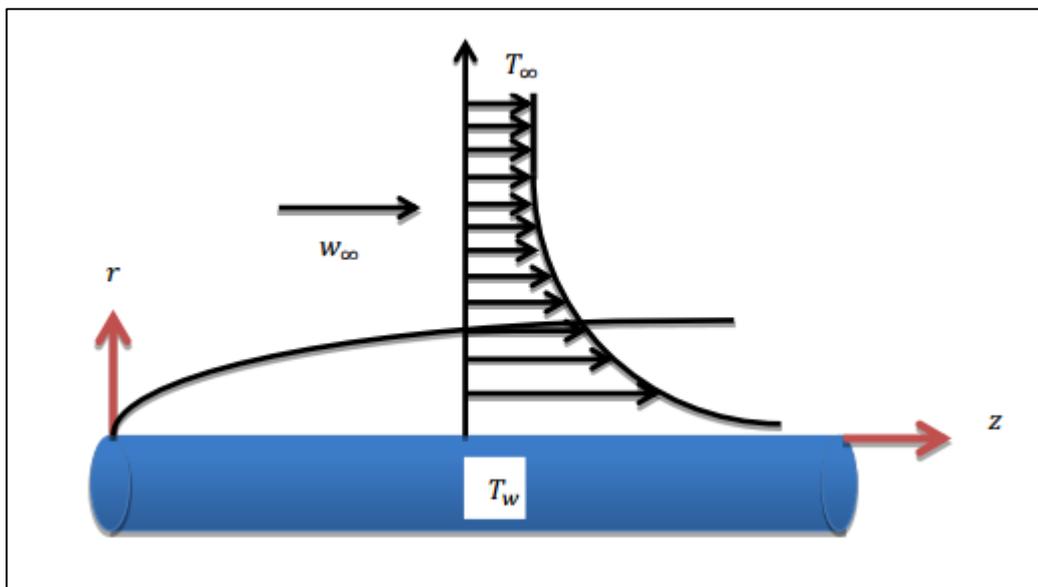


Figure I- 9 : Représentation d'une couche limite thermique.

I.11 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une revue sur les différents modes de transfert de chaleur ainsi qu'une étude détaillée sur les nano-fluides utilisés au cours de cette décennie, leurs propriétés physiques et leur application dans de nombreux problèmes.

Chapitre II :

Synthèse bibliographique

II.1 Introduction :

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Bien qu'il se manifeste sous diverses formes (rayonnement, conduction et convection), cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiés tels que le refroidissement des processeurs et des composants électroniques.

Plusieurs chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux en vue d'amélioration du transfert de la chaleur par convection en se basant sur la description des phénomènes gérant la convection.

Cette présentation n'a pas d'autre prétention que de fournir les bases pour une analyse des situations de convection mixte rencontrées dans les applications courantes. L'analyse complète d'un problème réel, le dimensionnement d'une installation ou l'optimisation d'un procédé où ces mécanismes convectifs interviennent parfois de façon déterminante nécessitent évidemment des connaissances spécifiques plus étendues. On a souhaité insister sur les aspects fondamentaux de cette question afin d'aider à la formulation d'un problème.

II.2 Synthèse bibliographique :

Malvandi et al. 2005. Ont étudié théoriquement les effets de la migration de nanoparticules en convection mixte dans un canal vertical en présence d'un champ magnétique uniforme. Les murs sont soumis à de différents flux thermiques, et les nanoparticules ont une vitesse de glissement relative à celle du fluide de base induite par le mouvement Brownien et thermophores. Considérant le développement complet des équations gouvernantes hydro-dynamiquement et thermiquement ; l'équation de continuité, de mouvement et de l'énergie ont été réduites et étudiées numériquement. Ils ont démontré que les nanoparticules s'éjectent elles même des parois chaudes, construisent des régions appauvries et s'accumulent dans la région centrale, mais elles sont susceptibles d'accumuler vers le mur avec le flux de chaleur inférieur, en outre ; l'inclusion des nanoparticules en présence du champ magnétique a une influence négative sur la performance.

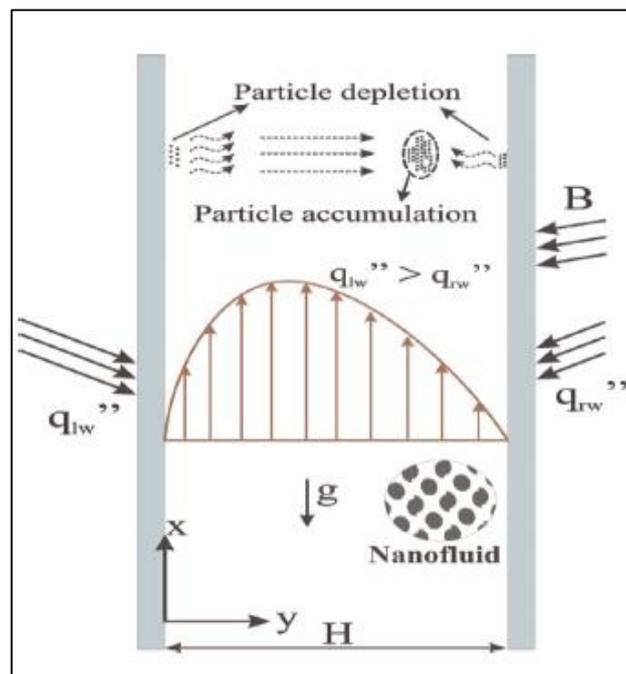


Figure II-1 : Modèle physique et les coordonnées du système (Malvandi et al. 2005)

Y. Harnane et al. 2008. Ont effectué une analyse numérique du refroidissement par convection mixte turbulente de l'air des blocs chauffés dans un canal vertical. Deux modèles de turbulences sont utilisés afin de caractériser l'écoulement turbulent, le modèle standard semi empirique $k - \varepsilon$ et le modèle RSM. Le fluide est newtonien, incompressible, le régime est stationnaire et purement turbulent. Le nombre de Reynolds est pris constant $Re = 5 \times 10^3$ et Grashof est $2.5 \times 10^7 \leq Gr \leq 5 \times 10^8$. La géométrie est bidimensionnelle, les

blocs sont identiques et sans source de chaleur, montés sur un seul côté du canal. Les parois du canal sont rigides, immobiles et adiabatiques. A l'entrée, l'écoulement est purement turbulent et est en fonction de l'intensité de turbulence et à la sortie du canal, l'écoulement est turbulent établi. Le tenseur d'effort de Reynolds est calculé selon l'hypothèse de Boussinesq. Le nombre de Prandtl turbulent est $Pr = 0.85$. L'approche numérique est basée sur la technique des volumes finis utilisée pour convertir les équations régissant aux équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. Le code Fluent est appliqué pour intégrer ces équations sur chaque volume de contrôle. L'algorithme Simple est utilisé pour la discrétisation des termes couplés de la pression - vitesse. Une description détaillée de l'écoulement autour des blocs a été présentée. Pour chaque modèle, la distribution détaillée du nombre de Nusselt local pour les différentes valeurs de Gr/Re^2 démontre une tendance semblable avec une intensification du transfert de chaleur lorsque le rapport Gr/Re^2 augmente. Par contre, différentes tendances de la distribution de Nusselt sont observées en utilisant les deux modèles.

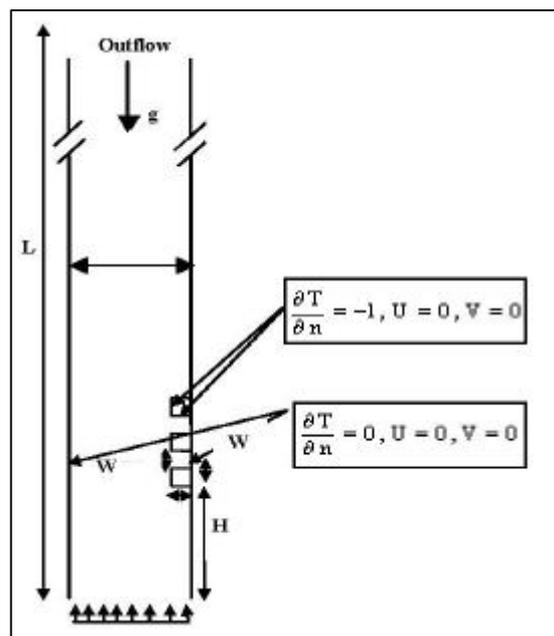


Figure II-2 : Géométrie considérée (Y. Harnane et al. 2008)

Rana et al. 2009. a étudié numériquement le flux de couche limite de convection mixte stable d'un nano-fluide incompressible le long d'une plaque inclinée à l'anneau α dans un milieu poreux tel que représenté sur la Figure II-3 les effets du nombre de mouvements browniens et de la thermophorèse sur le transfert de chaleur ont été étudiés. Leurs résultats

indiquent que le nombre de Nusselt a diminué avec l'augmentation des thermophores est le nombre ou le numéro de mouvement brownien.

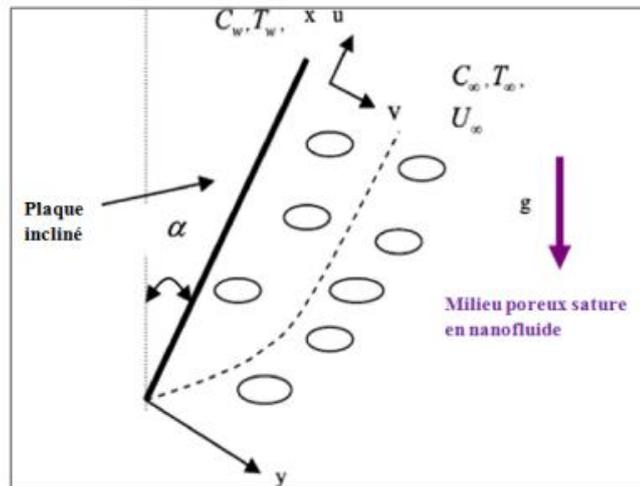


Figure II-3 : Modèle physique et système de coordonnées de (Rana et al. 2009)

I.Pishkar et B.Ghasemi 2010. Ont étudié numériquement la convection mixte dans un canal horizontal, deux ailettes conductrices sont montées sur la paroi inférieure qui est chauffée à une température constante en présence d'un nano-fluide (figure I.4), l'effet du nombre de Reynolds, du nombre de Richardson, de la fraction volumique, de la distance séparant les ailettes ainsi que leur conductivité thermique sur le taux de transfert de chaleur. Les résultats des simulations indiquent que le taux de transfert de chaleur est sensiblement influencé par la distance entre les ailettes et leurs conductivités thermiques. Par contre l'influence des valeurs plus élevées du nombre de Reynolds et de la fraction volumique sur l'augmentation du transfert de chaleur est plus remarquable.

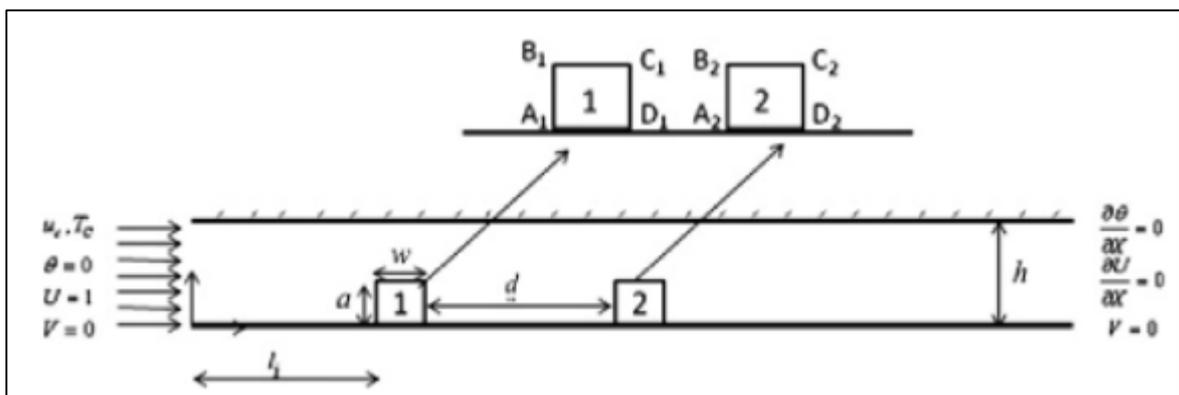


Figure II-4 : Modèle physique et système de coordonnées de (I.Pishkar et B.Ghasemi 2010)

Mina Shahi et al 2010. ont fait Une recherche numérique sur la convection mixte dans une cavité carrée avec une entrée et une sortie en utilisant un nano-fluide (Cu-eau) (figure I.5), la paroi inférieure est soumise à un flux de chaleur constant. L'étude a été effectuée en variant le nombre de Reynolds de 50 jusqu'à 1000, le nombre de Richardson entre 0 et 10 et la fraction volumique de 0 jusqu'à 0.05. Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation de la concentration des nanoparticules mène à l'augmentation du nombre de Nusselt moyen et à diminuer la température moyenne.

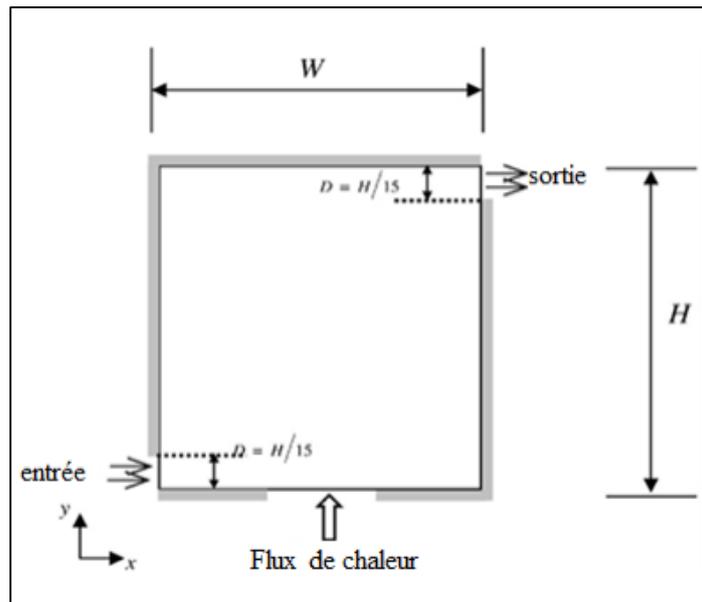


Figure II-5 : Schéma d'une cavité carrée avec des orifices d'entrée et de sortie. (Mina Shahi et al 2010)

A. Mansour et R.A. mohamed 2010. Ont fait une étude numérique de la convection mixte dans une cavité carrée partiellement chauffée du bas par une source de chaleur (figure I.6). Les effets de la variation du nano-fluide (eau-Cu, eau-AG, eau- Al_2O_3 , eau- TiO_2), du nombre de Reynolds, de la volumique, de la longueur et de l'emplacement de la source de chaleur ont été étudiés. Ils ont constaté que : - le nombre de Nusselt moyen augmente en augmentant la fraction volumique, par conséquent à une amélioration du transfert de chaleur.

1-A mesure que la longueur de la source de chaleur augmente la température du nano-fluide augmente.

2-En ajoutant des particules d'alumine (Al_2O_3) au fluide de base, le nombre de Nusselt augmente. Par contre, il diminue en ajoutant des nanoparticules d'oxyde de titane (TiO_2).

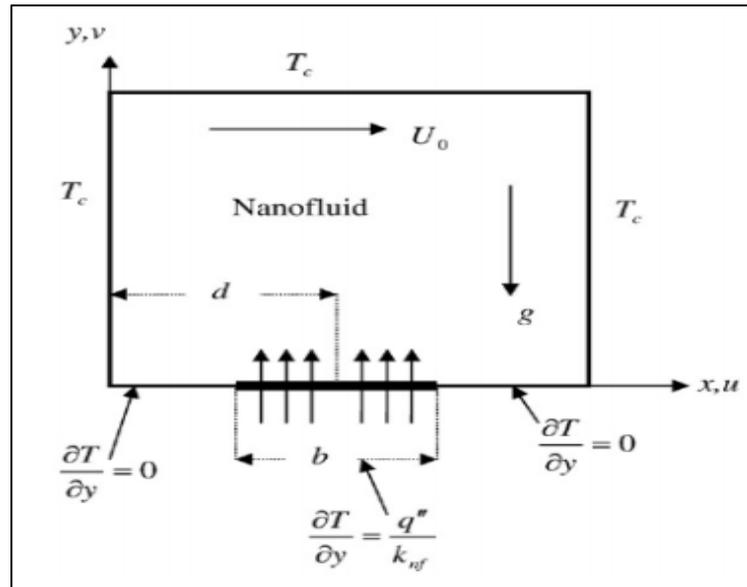


Figure II-6 : Schéma d'une cavité carrée partiellement chauffée. (A. Mansour et R.A. mohamed 2010)

Farhad Talebi et al 2010. Ont fait une étude numérique en convection mixte d'un écoulement laminaire utilisant un nano-fluide (cuivre-eau), dans une cavité carrée avec un couvercle mobile qui se déplace uniformément dans le plan horizontal (figure I-7), les parois horizontales supérieure et inférieure sont isolées tandis que les parois verticales sont maintenues à des températures constantes, mais différentes. L'étude a été réalisée pour un nombre de Rayleigh allant de 10^4 à 10^6 , un nombre de Reynolds variant entre 1 et 100, et la fraction volumique de 0 à 0,05. Les résultats montrent que pour un nombre de Reynolds fixe, la concentration volumique affecte la configuration de l'écoulement et du comportement thermique en particulier pour un plus grand nombre de Rayleigh. En plus l'effet de la concentration volumique diminue en augmentant le nombre de Reynolds.

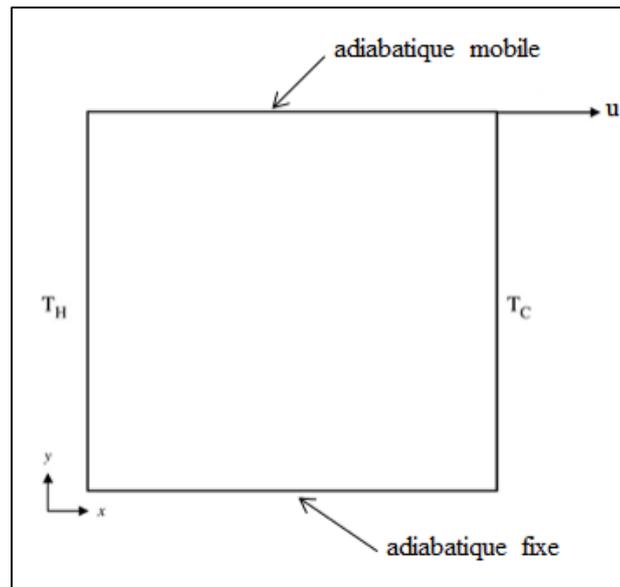


Figure II-7: Schéma d'une cavité carrée avec une paroi supérieure mobile.. (Farhad Talebi et al 2010)

M. Rostamani et al 2010. Ont étudié l'effet de la variation des nano-fluides pour différentes fractions volumique de nanoparticules circulant à travers une conduite soumise à un flux de chaleur constant (figure I.17). Les nano-fluides considérés sont des mélanges de (CuO-eau), (Al₂O₃-eau) et (TiO₂-eau). Les résultats montrent que pour Re allant de 20.000 à 100.000 et une fraction volumique entre (0 à 6%) le nombre de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur du nano-fluide sont fortement dépendants des nanoparticules. Cependant, l'effet des nanoparticules de CuO est meilleur que celui d'Al₂O₃ et de TiO₂ concernant l'augmentation du nombre de Nusselt.

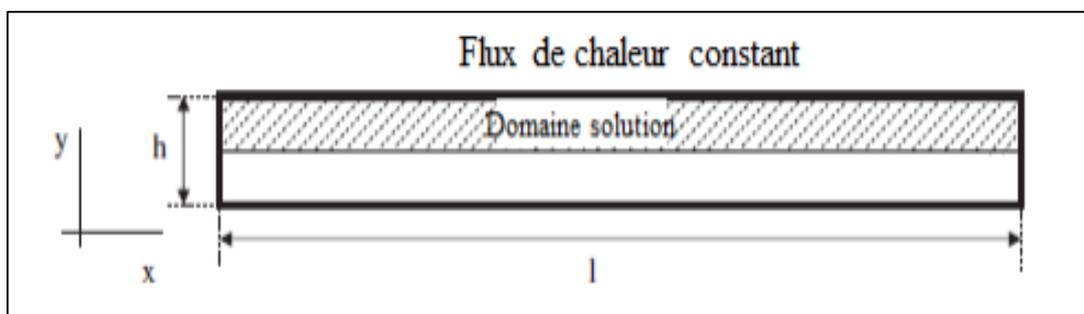


Figure II-8 : Schéma d'une conduite soumise à un flux de chaleur. (M. Rostamani et al 2010)

H. Nemati et al 2010. Ont étudié la convection mixte dans une cavité carrée avec un couvercle mobile utilisant les nano-fluides (eau-Cu), (eau-CuO) et (eau-Al₂O₃) (figure I.8). Les résultats indiquent que les effets de la fraction volumique sont importants pour Al₂O₃, CuO et Cu. En outre, l'augmentation du nombre de Reynolds tend à diminuer l'effet de la fraction volumique. Les résultats montrent aussi que le type du nano-fluide est un facteur clé pour l'amélioration du transfert de chaleur sachant que les valeurs minimales et maximales du nombre Nu sont obtenues en utilisant Cu et Al₂O₃ respectivement.

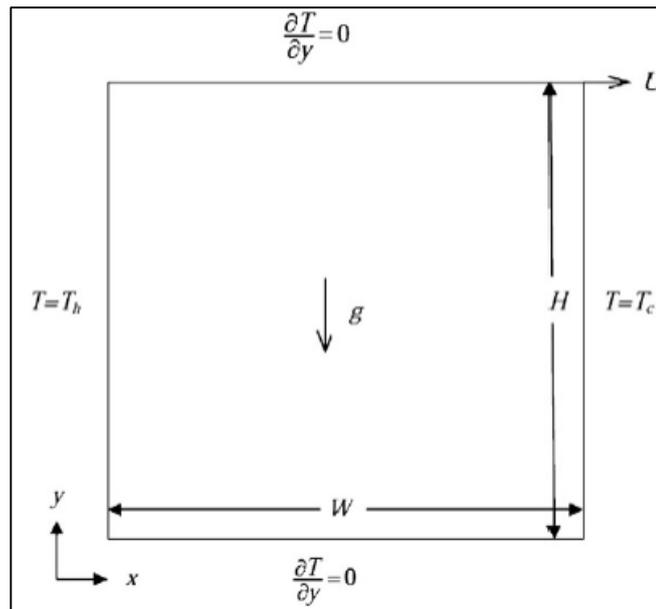


Figure II-9 : Schéma d'une cavité carrée avec un couvercle mobile. (M. Rostamani et al 2010)

B. Ghasemi et S.M. Aminossadati 2010. Ont fait une étude numérique sur la convection mixte dans une cavité triangulaire remplie d'un nano-fluide (eau -Al₂O₃) avec une paroi mobile (figure I.9). Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules Al₂O₃ améliore le taux de transfert de chaleur pour toutes les valeurs du nombre de Richardson et pour chaque direction du mouvement de la paroi coulissante. Cependant, ils ont constaté que le taux de transfert de chaleur est plus élevé en raison du renforcement du flux circulant par les effets du mouvement de la paroi.

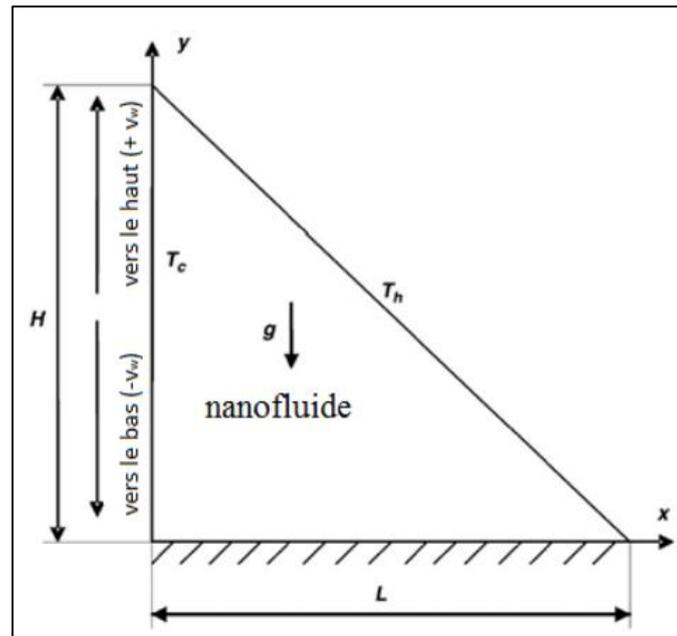


Figure II-10 : Cavité triangulaire avec une paroi mobile. (B. Ghasemi et S.M. Aminossadati 2010)

Une autre numérique en convection mixte a été faite par **Saeed Mazrouei Sebdania et al 2011**, elle consiste à étudier l'effet de la variation des propriétés du nano-fluide dans une cavité carrée avec une source de chaleur sur la paroi inférieure (figure I.10). Cette étude à montrer que pour $Re = 1$, le taux de transfert de chaleur diminue pour des fractions volumiques des nanoparticules plus considérablement que 0.05. Mais pour des valeurs de Reynolds élevés entre (10 et 100), l'addition des nanoparticules motive l'augmentation du taux de transfert de chaleur, il augmente aussi à $Ra = 103$ tandis qu'à $Ra = 104$ et 105 il diminue. Ajoutant que le taux de transfert de chaleur diminue en augmentant le volume des nanoparticules.

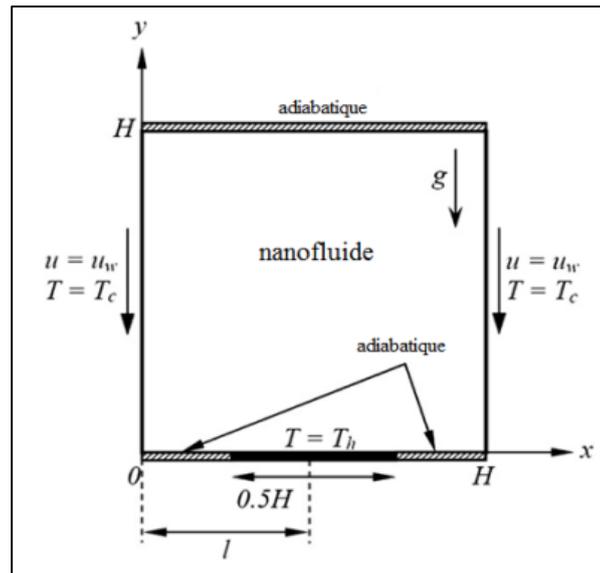


Figure II-11 : Schéma d'une cavité carrée avec une source de chaleur sur la paroi inférieure. (Saeed Mazrouei Sebdania et al 2011)

Hang Xu et Ioan Pop 2012 ont fait une analyse numérique de la convection mixte dans un canal vertical rempli de nano-fluides (figure I.11), en étudiant analytiquement la flottabilité ainsi que l'effet de la fraction de volume des nanoparticules sur la distribution de la température et de la vitesse. Ils ont constaté que le gradient de pression et de flottabilité sont orientés dans la direction de déplacement des nanoparticules et que le gradient de température varie linéairement. Dans chaque région les profils de la vitesse demeurent semblables pour diverse valeurs de Ra. On outre la fraction de volume à des effets non négligeables sur du transfert de la chaleur et la masse du fluide.

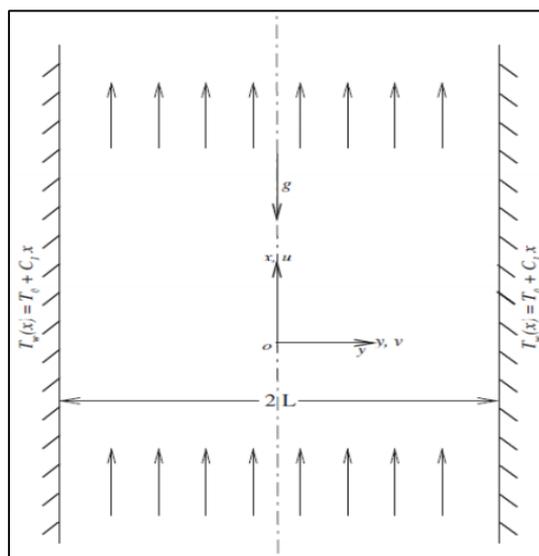


Figure II-12 : Schéma d'un canal vertical rempli de nano-fluides. (Hang Xu et Ioan Pop 2012)

La convection mixte MHD d'un nano-fluide dans un canal a fait l'objet d'un travail de recherche réalisé par **Shehzad et al. 2014** qui ont pris en considération la dissipation visqueuse et le chauffage par effet Joule. L'approche diphasique a été utilisée pour caractériser l'écoulement du nano-fluide. Ils ont noté que la concentration des nanoparticules près des parois augmente avec le paramètre thermophorèse, par contre un effet opposé est observé lors de l'augmentation du paramètre Brownien.

D.srinivasa et G.swamy 2016. Ont étudié le transfert chaleur par convection mixte et le transfert de masse le long d'une plaque verticale encastré dans une loi de puissance, milieu poreux de Darcy saturé d'un fluide en présence d'une réaction chimique sous l'effet de rayonnement.

Les équations différentielles partielles sont transformées en équations ordinaires en utilisant les transformations de similitude, puis elles ont résolues numériquement avec la méthode de Rung-kutta technique de tir.

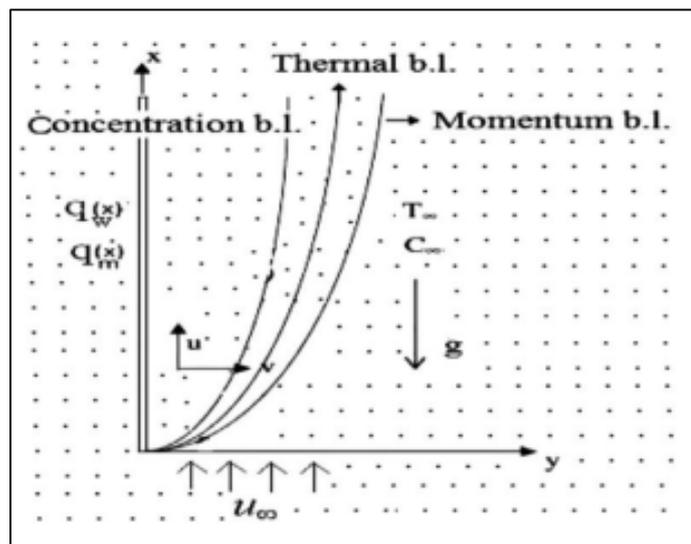


Figure II-13 : Modèle d'écoulement et le système de coordonnées. (Hang Xu et Ioan Pop 2012)

S. Das et al. 2016. Ont étudié la convection naturelle transitoire dans un canal vertical rempli de nano-fluides lorsque le rayonnement thermique est pris en considération. Ils ont résolu les équations gouvernantes en employant la technique de transformation de Laplace. Les solutions exactes pour la vitesse et la température du nano-fluide sont obtenues dans le cas de la température de surface prescrite (PST) et le flux thermique prescrit (PHF). Les résultats numériques pour la vitesse et la température du nano-fluide sont présentés

graphiquement pour les paramètres pertinents et discutés en détail. La vitesse du fluide est plus grande dans le cas du PST que dans le cas de PHF.

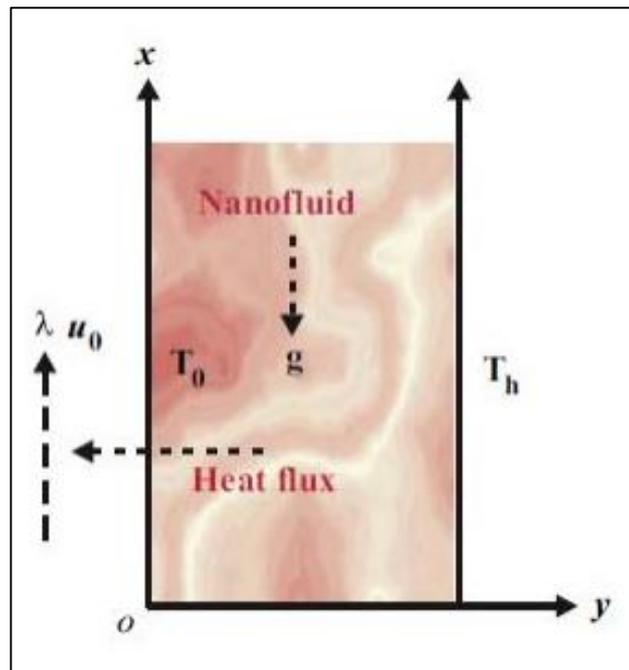


Figure II-14 : La géométrie du problème. (S. Das et al. 2016)

Dans ce travail, **E.Belahmadi et al. 2016** présentent une étude numérique bidimensionnelle de la convection mixte laminaire dans un canal vertical rempli du nano-fluide Cu-eau. Les parois du canal sont maintenues à une température uniforme et relativement élevée T_w . Un courant ascendant de nano-fluide Cu-eau pénètre dans le canal à une température constante relativement faible T_0 , et une vitesse uniforme V_0 . Le logiciel Ansys-Fluent 14.5 a été utilisé pour résoudre le modèle mathématique : l'équation de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Les résultats obtenus sont validés avec des données trouvées dans la littérature.

Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, des isothermes, du nombre de Nusselt local et moyen pour différentes valeurs des nombres du Reynolds et du Grashof et de la fraction volumique des nanoparticules. Les résultats montrent que les paramètres précédents ont des effets considérables sur les champs d'écoulement et thermiques. Il a été constaté que l'augmentation de Reynolds, Grashof et la fraction volumique des nanoparticules améliore le transfert de chaleur.

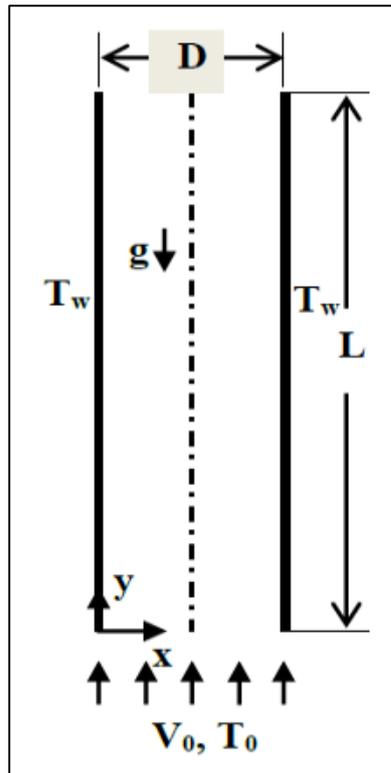


Figure II-15 : La géométrie du problème. (E.Belahmadi et al. 2016)

Un travail de **M. Benzema et al. 2017** consiste en une caractérisation de l'écoulement laminaire et stationnaire d'un nano-fluide traversant une cavité ventilée ainsi qu'à la quantification des échanges convectifs qui s'y opèrent. La cavité en question est de forme géométrique trapézoïdale à angle droit et est traversée par un écoulement d'un nano-fluide hybride Ag-MgO / Eau (50:50 vol %) en régime laminaire et stationnaire. L'enceinte est supposée être de longueur infinie suivant la troisième direction lui conférant ainsi un caractère bidimensionnel. De plus, la cavité est soumise à l'action d'un champ magnétique externe et uniforme. Les équations gouvernantes adimensionnelles ainsi que les conditions aux limites qui sont associées sont résolues numériquement au moyen de la méthode des volumes finis en employant l'algorithme SIMPLER pour le couplage pression-vitesse. Les résultats issus des simulations pour le cas de la convection mixte pure sont analysés d'une part, à travers les champs hydrodynamique et thermique au sein de la cavité ainsi que des profils de vitesse. D'autre part, les échanges thermiques au niveau de la paroi active inclinée sont quantifiés par le calcul du nombre de Nusselt moyen. Dans le but d'obtenir une cavité offrant les meilleures performances thermiques, une étude paramétrique est réalisée en considérant les effets des nombres de Reynolds, de Hartmann ainsi que la fraction volumique totale en nanoparticules. L'examen des résultats indique que l'écoulement du nano-fluide est fortement affecté par l'application d'un champ

magnétique. En outre, l'augmentation des nombres de Reynolds et de Hartmann améliore les performances thermiques de la cavité. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique. Cependant, l'apport de ces dernières sur l'amélioration du transfert thermique devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.

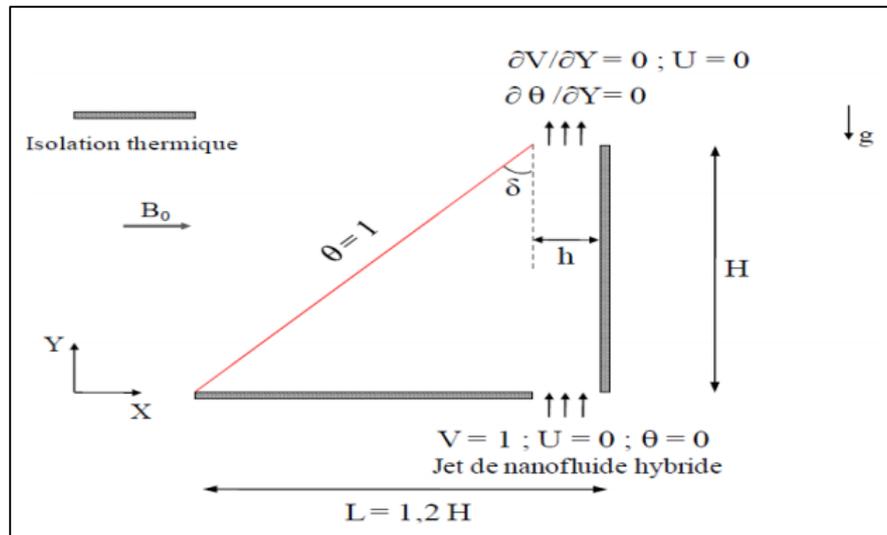


Figure II-16 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles. (M. Benzema et al. 2017)

Yuan Ma et al. 2019 ont présenté une simulation numérique bidimensionnelle pour étudier l'effet du champ magnétique sur le nano-fluide Ag-MgO en convection forcée et le transfert de chaleur dans un canal avec de réchauffeurs et des refroidisseurs actifs. Le code Fortron selon la méthode Lattice Boltzman (LBM) est développé pour cet objectif. Les effets d'arrangement thermique (cas 1, 2 et 3), la longueur à côté des blocs, le nombre de Reynolds, le nombre de Hartmann et la fraction volumique des nanoparticules sur le schéma d'écoulement et les caractéristiques de transfert de chaleur sont analysées systématiquement. Les résultats obtenus ont montré que la valeur la plus élevée du nombre local de Nusselt se produit à la jonction du réchauffeur et du refroidisseur en raison du gradient de température élevé, suivi par le coin aigu des radiateurs et des refroidisseurs. De plus, le transfert de chaleur à l'angle aigu du réchauffeur est plus élevé que celui de l'angle aigu plus froid. Les chiffres moyens de Nusselt indiquaient que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation ou la diminution du Ha. Enfin, le taux de transfert de chaleur dans le 1er cas est supérieur aux deux autres cas.

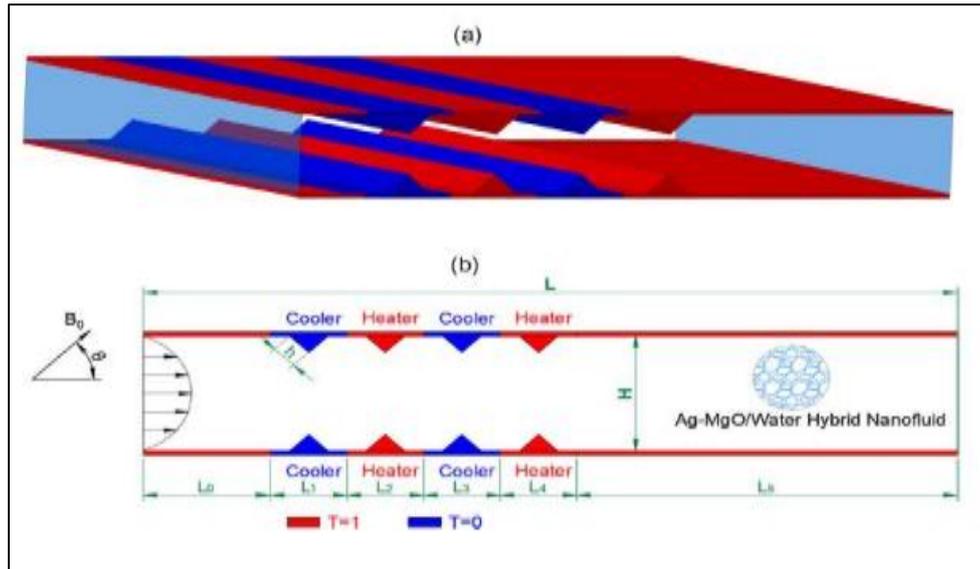


Figure II-17 : Diagramme schématique du modèle physique. (Yuan Ma et al. 2019)

Gangtao Liang et al.2019 ont publié concernant les bénéfices du transfert de chaleur des nano-fluides pour les macrocanaux et les microcanaux. Sont inclus à la fois des résultats expérimentaux et numériques concernant plusieurs paramètres de performance importants, y compris les coefficients de transfert thermique monophasés et biphasés, la chute de pression et le flux de chaleur critique (CHF), chacun étant évalué en fonction de mécanismes supposés responsables de toute amélioration de la performance ou détérioration. Ils ont abordé également d'importantes questions pour la performance de transfert de chaleur, y compris la minimisation de l'entropie, les méthodologies d'amélioration hybrides, et la stabilité des nano-fluides, ainsi que les rôles de la diffusion Brownien et la thermophorèse. Les résultats publiés indiquent une amélioration sensible du coefficient de transfert de chaleur monophasé obtenu dans la région d'entrée, mais l'amélioration diminue en aval.

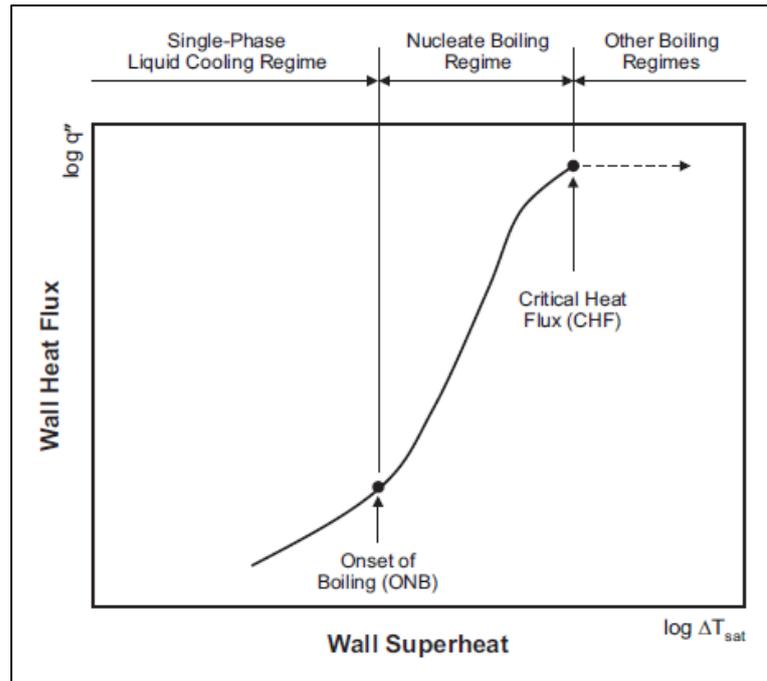


Figure II-18 : Diagramme schématique du modèle physique. (Yuan Ma et al. 2019)

II.3 Conclusion :

A travers ce chapitre, il apparaît en premier lieu que les nombreux travaux réalisés sur la convection en présence des nano-fluides ont touché à divers aspects du problème soit en variant les conditions aux limites, soit en changeant la géométrie ou le type d'analyse c'est à dire chercher des solutions exactes par diverses méthodes analytiques ou des solutions numériques.

Chapitre III :

Formation mathématique et
présentation de logiciel

III.1 Introduction :

Le terme convection est habituellement connu sous le nom de transport d'énergie par gradients potentiels et mouvements du fluide. La convection est un mode de transfert de chaleur qui est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Les caractéristiques du transfert de chaleur est le transport de l'énergie par mouvement moléculaire, ce que l'on appelle par « diffusion » ; et par mouvement macroscopique du fluide, ce que l'on appelle par « advection ». Ce phénomène est formulé mathématiquement par les équations aux dérivées partielles. (Y. Boubaker et al ,2019).

Ce chapitre expose la description du problème et la simulation par le code de calcul FLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes tels que le nôtre. Les méthodes CFD (Computational Fluid Dynamics) ont l'avantage de mettre en œuvre les équations générales de la mécanique des fluides avec un maximum d'hypothèses.

L'avantage principal de ces « moyens numériques » est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement identifiées en tout point de l'écoulement.

La construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le processeur GAMBIT.

III.2 Description du problème :

Le modèle physique est un canal vertical à plaques parallèles ayant un rapport de longueur sur largeur de $A = L/D = 50$ (Figure III-1) Les dimensions géométriques du problème étudié sont basées sur les données publiées par (G.Desrayaud et al ,2009) Les parois du canal sont maintenues à une température uniforme élevée, T_w . Un courant ascendant de nano-fluide (*dioxyde de titane TiO_2 + eau*) pénètre dans le canal à une température constante faible, T_0 , et une vitesse V_0 . Les conditions d'état sont considérées stables et le flux du nano-fluide est supposé être laminaire et incompressible. Il est également supposé que l'eau et les nanoparticules de TiO_2 sont en équilibre thermique et voyagent à travers le canal avec la même vitesse, et que les nanoparticules de TiO_2 ont une forme et une taille uniformes. Les propriétés thermo-physiques de l'eau pure (le fluide de base) et les nanoparticules sont supposées constantes et elles sont présentées dans les Tableaux III-1et 2.

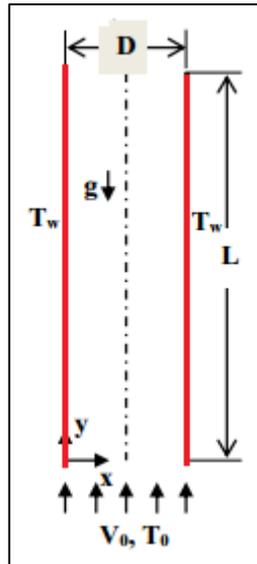


Figure III-1 : Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites.

Les paramètres géométriques des problèmes étudiés sont représentés dans le tableau (III-1).

Tableau III-1 : Dimensions du capteur étudié.

<i>Dimensions</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Langueur du Canal</i>	<i>L</i>	<i>1.50</i>	<i>[m]</i>
<i>Diamètre du Canal</i>	<i>D</i>	<i>0.030</i>	<i>[m]</i>

III.3 Modèle mathématique :

La résolution des problèmes posés dans ce travail passe par la construction d'un modèle mathématique. En effet, ce modèle, est basé sur des équations de la mécanique des fluides qui sont d'une complexité telle, qu'il est impossible à résoudre, sauf en faisant intervenir un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, afin de déterminer le comportement du système étudié en termes d'écoulement du fluide caloporteur et de transfert de chaleur dans le système.

III.4 Hypothèses simplificatrices :

- ✓ Pour la modélisation de l'écoulement, nous avons posé les hypothèses suivantes :
- ✓ Le régime d'écoulement est considéré comme stationnaire ;
- ✓ L'écoulement est bidimensionnel (2D) ;
- ✓ Le régime est laminaire ;

✓ Le fluide caloporteur est incompressible ;

Tableau III-2 : Propriétés des Matériaux utilisés.

Solide	Matériaux	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/(kg.k)]	λ [J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹]
Les parois	Aluminium	2719	700	237

Tableau III-3 : Les propriétés physiques de fluide de base utilisée l'eau (20°C).

Fluide	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/(kg.k)]	λ [W.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [(kg/m.s)]
Eau	997.05	4179	0.6072	1.003.10 ⁻³

Tableau III-4 : Les propriétés physiques du nano-fluide (dioxyde de titane TiO₂ + eau) avec différentes fractions volumiques :

φ	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/(kg.k)]	μ [(kg/m.s)]	β [K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
1 %	1030,718	4037,85631	0,00102852	2,08042E-05	0,61493193
2 %	1063,236	3902,52959	0,00105496	2,06084E-05	0,63011366
3 %	1095,754	3775,23489	0,00108236	2,04126E-05	0,64555152
4 %	1128,272	3655,27772	0,00111077	2,02168E-05	0,66125205
5 %	1160,79	3542,04144	0,00114023	0,000020021	0,67722201
6%	1193,308	3434,9766	0,0011708	1,98252E-05	0,69346839
7%	1225,826	3333,59207	0,00120252	1,96294E-05	0,70999844
8%	1258,344	3237,44748	0,00123547	1,94336E-05	0,72681964
9%	1290,862	3146,14683	0,00126969	1,92378E-05	0,74393976
10%	1323,38	3059,33304	0,00130525	0,000019042	0,76136684

III.5 Equations gouvernantes :

Selon les hypothèses mentionnées ci-dessus, les équations gouvernantes du problème peuvent être écrites sous la forme dimensionnelle suivante :

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] \quad \text{(III.2)}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right] + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_0) \quad (\text{III.3})$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.4})$$

Où les propriétés du nano-fluide peuvent être définies en fonction des propriétés de l'eau et des nanoparticules de TiO_2 comme suit :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (\text{III.5})$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (\text{III.6})$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi) (\rho\beta)_f + \phi (\rho\beta)_s \quad (\text{III.7})$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (\text{III.8})$$

La viscosité dynamique effective et la conductivité thermique du nano-fluide peuvent être modélisées par (H. C. Brinkman, 1952) et (J. C. Maxwell, 1873) :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (\text{III.9})$$

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (\text{III.10})$$

III.6 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites dimensionnelles qui permettent de résoudre les équations (1) à (4) sont les suivantes :

$$u = 0, v = 0 \text{ et } T = 60 \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ pour } x = 0 \text{ et } 0 \leq y \leq L$$

$$u = 0, v = 0 \text{ et } T = 60 \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ pour } x = D \text{ et } 0 \leq y \leq L$$

$$u = 0, v = V_0 \text{ et } T = 20 \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ pour } y = 0 \text{ et } 0 \leq x \leq D$$

$$u = 0, \partial v / \partial y = 0 \text{ et } \partial T / \partial y = 0 \text{ pour } y = L \text{ et } 0 \leq x \leq D$$

III.6.1 Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho v D h}{\mu} \quad (\text{III.11})$$

III.6.2 Le nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt local (Nu) le long des parois verticales peut être exprimé par :

$$Nu(y) = \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0 \text{ or } 1} \quad (\text{III.12})$$

Le nombre de Nusselt moyen (Num) est déterminé en intégrant le nombre de Nusselt le long des deux parois verticales :

$$Nu_m = \frac{2}{L} \int_0^L Nu(y) dy \quad (\text{III.13})$$

III.6.3 Le nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta L^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

β : Coefficient d'expansion thermique.

T : Différence de températures entre la surface du solide et la surface libre du fluide.

L: Longueur caractéristique.

Ce nombre exprime le rapport entre les forces de gravité multipliées par les forces d'inertie et le carré des forces de viscosité. (M. Dagueneat , 1985).

III.6.4 Le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (\text{III.15})$$

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

μ : viscosité dynamique en (PI).

C_p : chaleur massique en (J/kg.k).

Ce nombre représente le rapport de la diffusivité mécanique ν à la diffusivité thermique. UN fluide peu visqueux mais bon conducteur thermique, aura un Pr très faible et vice-versa.

III.7 Principe du calcul numérique :

Le principe du calcul numérique est illustré à la figure (III.2). Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- ✓ Méthodes des différences finies (MDF) ;
- ✓ Méthodes des éléments finis (MEF) ;
- ✓ Méthodes spectrales (MS) ;
- ✓ Méthodes des volumes finis (MVF).

L'algorithme de résolution numérique implique la méthode d'intégration temporelle et de découplage, comme par exemple, les algorithmes SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC et PISO. (SANDALI, 2014)

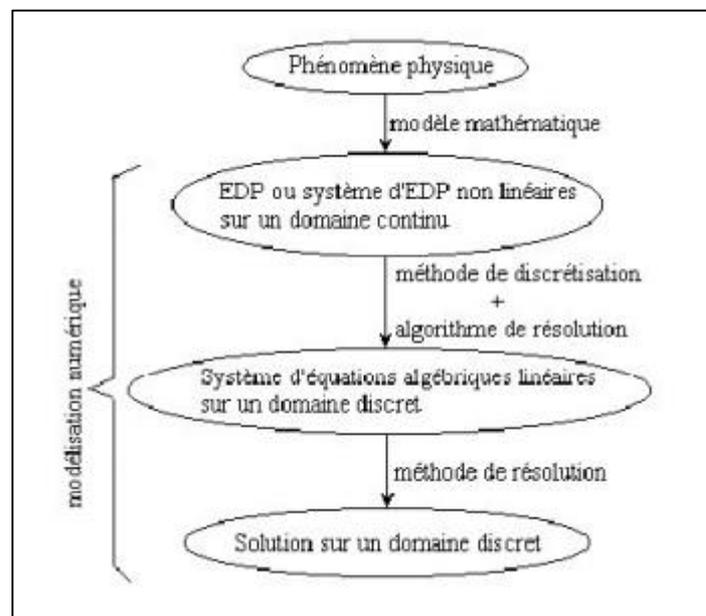


Figure III-2 : Le principe du calcul numérique. (SANDALI, 2014).

III.8 Rappel sur la méthode des volumes finis (MVF) :

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow). C'est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

III.9 Différentes étapes de l'approche numérique :

On peut résumer les différentes étapes de cette approche numérique dans ce qui suit :

- ✓ Création de la géométrie et son maillage : Ces deux étapes sont réalisées au niveau du "Gambit". Un maillage fin (serré proche des parois) doit être choisi à cause des gradients de vitesse et de pression élevés proche des parois.
- ✓ Définition des conditions aux limites : De même cette étape est aussi réalisée en utilisant le "Gambit".
- ✓ Résolution du problème avec le code FLUENT

III.10 Présentation du logiciel Gambit :

Gambit est un logiciel industriel permettant la construction des géométries et leurs maillages en 2D ou 3D. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels comme par exemple Fluent. Lors de la création d'une session, Gambit crée quatre fichiers :

- ✓ Un fichier d'extension « dbs » qui contient toutes les données de la session ;
- ✓ Un fichier « jou », qui retrace l'historique de la session ;
- ✓ Un fichier « trn », qui reprend toutes les commandes et leurs résultats lors des différentes sessions ;
- ✓ Un fichier « lok ».

Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie), le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Type de conditions aux limites) et définition des domaines de calculs. [[Gambit 2.2.30 User's Guide, 2006](#)].

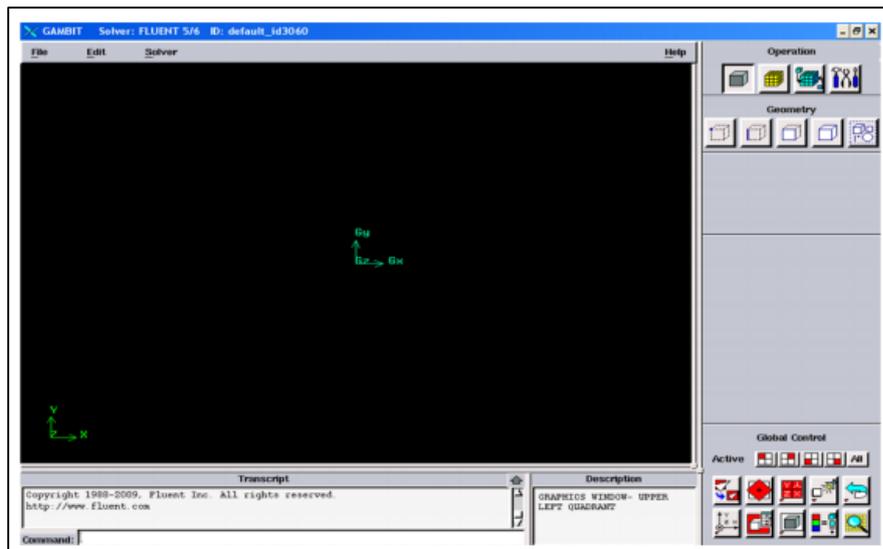


Figure III-3 : Lancement du Gambit.

III.11 Maillage :

La réalisation d'un maillage se fait en deux étapes : la création de la géométrie (CAO) puis, son maillage surfacique 2D (notre cas) ou volumique 3D. Avant de commencer à construire la géométrie support du maillage, il convient de bien réfléchir au découpage topologique du domaine physique. Le choix du maillage est une étape importante de la simulation numérique. Il est donc important de bien choisir un maillage qui s'adapte au mieux aux problèmes considérés.

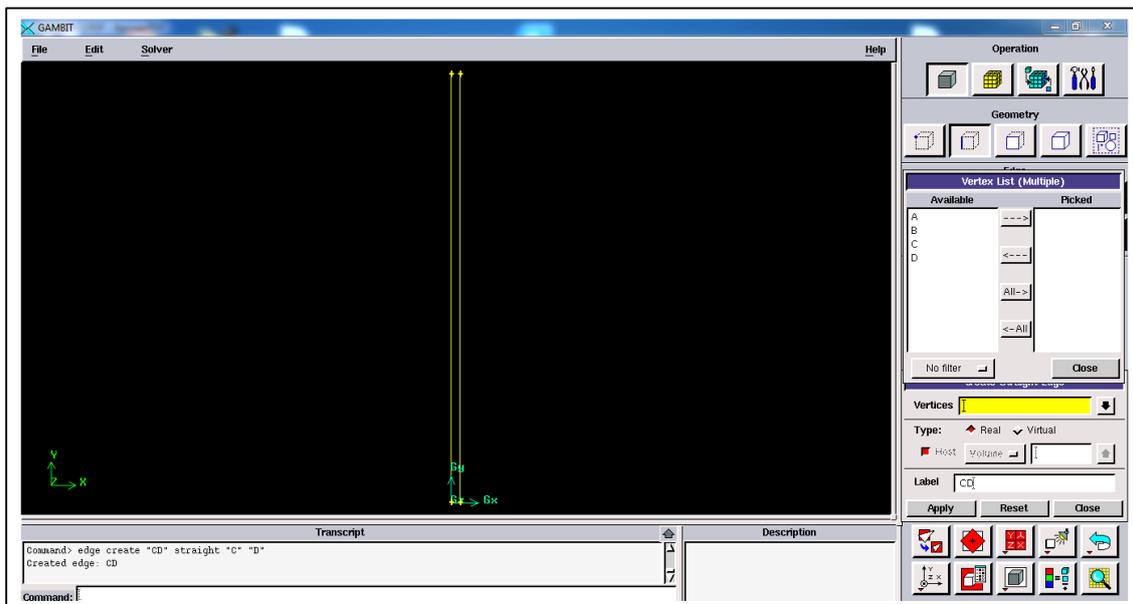


Figure III-4 : Création de la géométrie.

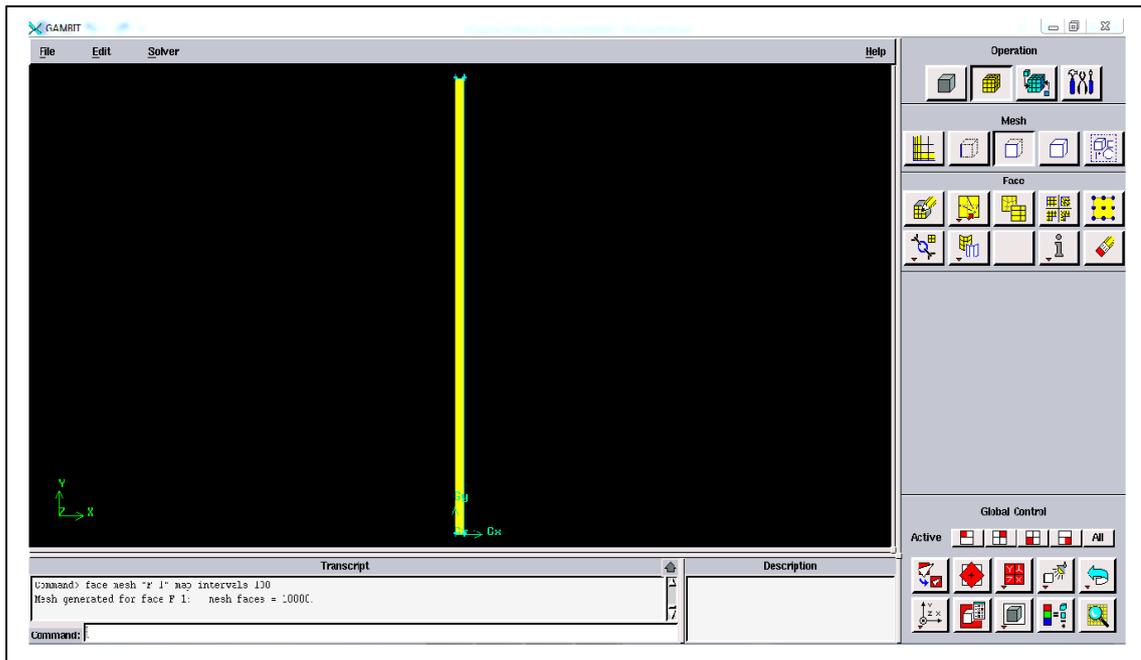


Figure III-5 : Maillage surfacique.

❖ **Choix du type de maillage :**

Il existe plusieurs types de maillages, tels que le maillage structuré, le non-structuré et l'hybride (combinaison géométrique d'éléments de différentes natures). Un maillage structuré est généralement composé de cellules quadrilatérales en 2D (maillage surfacique). Tandis qu'un maillage non-structuré peut être composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D.

a) Maillage structuré (Quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie en outils bloqué, il présente **les avantages suivants** : Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent ; Réduit les risques d'erreur numérique car l'écoulement est aligné avec le maillage. **Ses inconvénients** : Difficiles à les générer dans le cas d'une géométrie complexe ; Difficile d'obtenir une bonne quantité de maillages pour certaines géométries complexes.

b) Maillage non structuré (Tri/Tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte à leur disposition. **Ses avantages** : Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments ; Les algorithmes de génération de ce type de maillage (Tri/Tétra) sont très automatisés. **Ses inconvénients** : Très gourmand en nombre

de mailles comparativement au maillage structuré ; Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

c) Maillage hybride :

Maillage généré par mélange d'éléments de différents types triangulaire ou quadrilatéraux en deux dimensions, tétraédriques, prismatiques ou pyramidaux en trois dimensions. **Ses avantages :** Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du non structuré.

❖ **Qualité du maillage :**

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- ✓ Maintenir une bonne qualité des éléments.
- ✓ Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- ✓ Assurer un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- ✓ Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable). Enfin, la qualité de maillage à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout le temps de calcul.

III.12 Conditions aux limites et définition du domaine :

Lorsqu'on termine le maillage du domaine on pose les conditions aux limites :

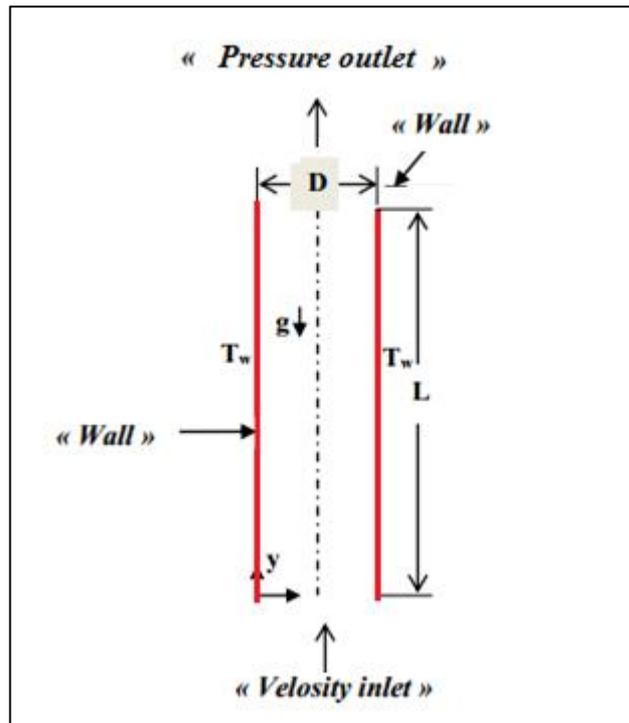


Figure III-6 : Schéma des conditions aux limites.

Toutes les limites doivent être définies, et elles doivent l'être à partir des nœuds (NODE). L'utilisateur doit adapter la géométrie aux conditions limites, un segment en 2D ne peut être lié à plus d'un type de limite. Toutes les limites du même type (exemple toutes les parois) peuvent être définies sous une limite unique. Attention, chaque limite doit être nommée (éviter le nom par défaut) dans Gambit, même les limites usuelles. Seules les interfaces entre les sous blocs ne doivent pas apparaître dans les limites. , nous avons imposé une vitesse à l'entrée du canal, nous avons utilisé la condition (Velocity inlet), et une pression à la sortie (Pressure outlet). L'intérieur du domaine est considéré comme « Fluide » incompressible « (dioxyde de titane TiO_2 + eau) ».

III.13 Présentation du code FLUENT :

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans transfert thermique. Le logiciel « Fluent » utilise la méthode des volumes finis. Il est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un seul PC de travail ou sur des machines en parallèles, pour une exécution plus efficace. Le package Fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le

mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que :

- ✓ Ecoulements 2D ou 3D ;
- ✓ Ecoulement stationnaire ou instationnaire ;
- ✓ Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- ✓ Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- ✓ Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- ✓ Ecoulement avec changements de phases ;
- ✓ Ecoulements en milieu poreux.

Résolution du problème avec le code FLUENT :

➤ **1^{ère} étape :**

On lance le solveur FLUENT, on sélectionne (2ddp), aussi bien pour une simple précision de calcul.



Figure III- 7: Type de résolution

➤ 2^{ème} étape (Lecture du maillage) :

On sélectionne le menu File → Read → Case...

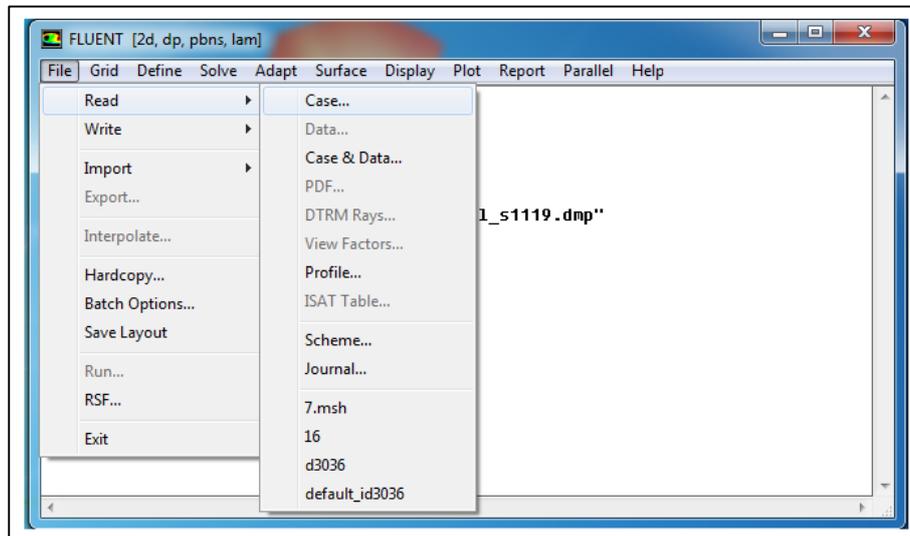


Figure III-8 : La lecture de la grille.

➤ 3^{ème} étape

Pour voir le maillage, on sélectionne sur : Display → Grid.

➤ 4^{ème} étape

Pour choisir une des formules de solution, nous employons le panneau de solveur :

Define → Models → Solver.

Dans notre problème l'écoulement est stationnaire et pour cela on choisit le cas (steady) en sélection sur le bouton OK.

➤ 5^{ème} étape

Si l'écoulement est laminaire et le représenter au fluent. On sélectionne sur :

Define → Models → laminaire. (Figure III-10), puis en valide ok.

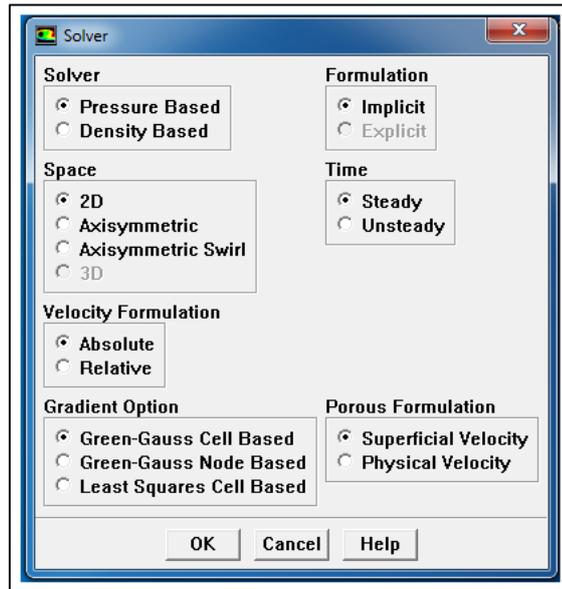


Figure III-9 : Fenêtre solveur.

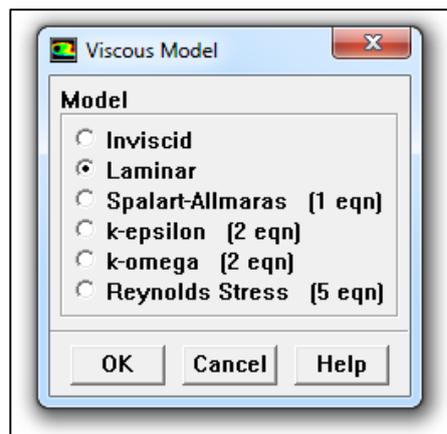


Figure III-10: Fenêtre de modèle visqueux.

➤ 6^{ème} étape

Pour placer les propriétés de fluide pour notre problème,(figure III-11) on sélection sur :

Define → Materials

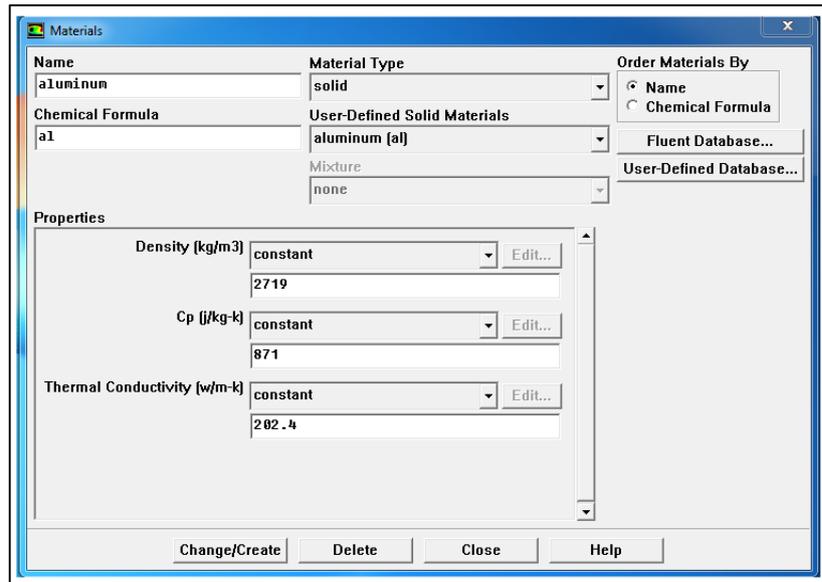


Figure III-11: Fenêtre de Matériaux

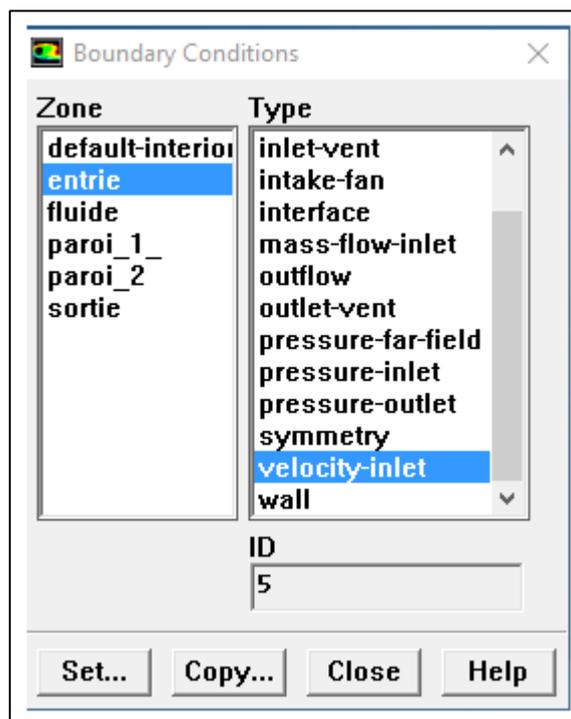


Figure III-12 : Valeurs des conditions aux limites.

➤ 7^{ème} étape :

L'installation du problème est presque complète. Maintenant on tourne vers la surveillance résiduelle graphique de sorte qu'on puisse facilement observer le progrès de la solution. Pour faire ceci, on choisit : Solve → Monitors → Residual,

pour ouvrir les moniteurs résiduels lambrisse montré sur (figure III-13). Sous les options allumez l'option **plot** pour activer l'affichage graphique des résiduels pendant le calcul, et on sélection alors sur OK.

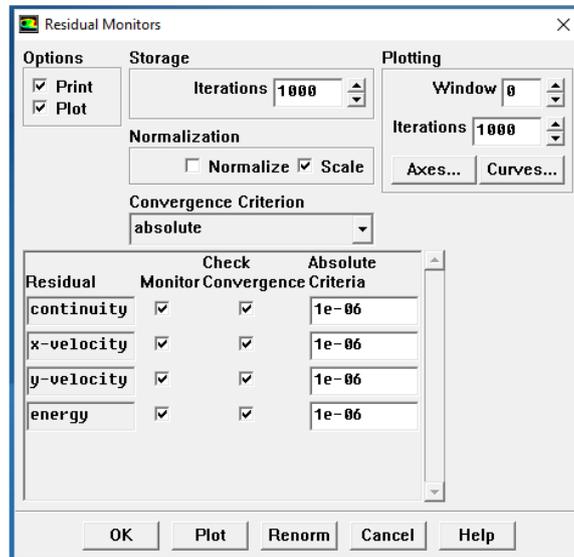


Figure III-13 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.

➤ 8^{ème} étape :

Avant de réitérer, il faut initialiser le champ d'écoulement pour fournir un point de départ de la solution. On peut donc choisir le calcul de la solution initiale des arrangements d'une condition aux limites où le champ entrant l'écoulement évalue individuellement. En cliquant : Solve —> Initialize, pour ouvrir le panneau d'initialisation de la solution représentée sur la (figure III. 14).

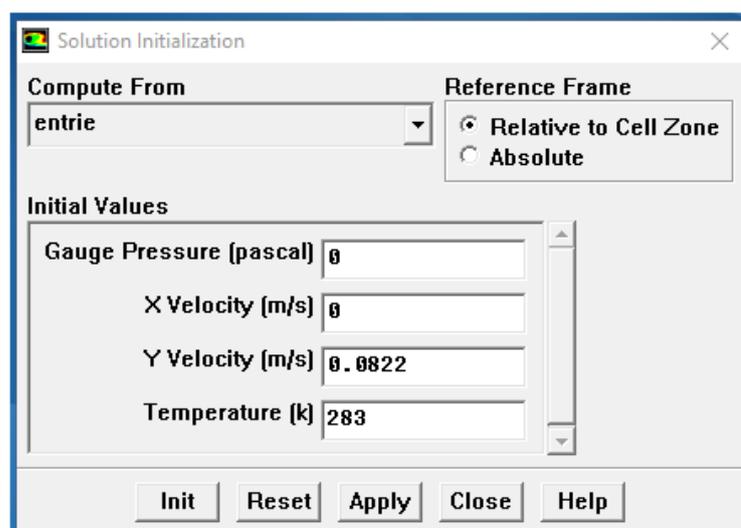


Figure III-14 : Fenêtre de solution initialisation.

➤ 9^{ème} étape :

Maintenant on peut commencer les itérations. On clique sur : Solve → Itérate, ceci ouvre le panneau de l'itération représenté sur la (figure III-15).

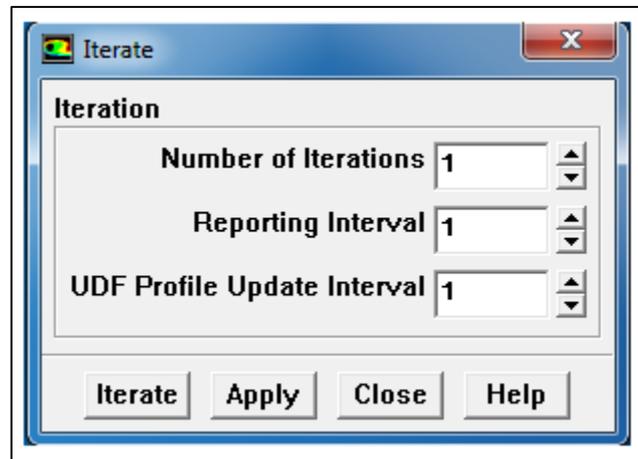


Figure III-15 : Choix du nombre des itérations.

Après avoir fixé les conditions de la température et de pression respectivement la **vitesse** entre et **pression** sortie. Nous initialisons les données et Il nous reste qu'à lancer les itérations comme suit : Solve → initialize → iterate.

On remarque que la convergence est atteinte après 746 itérations, (figure III- 16).

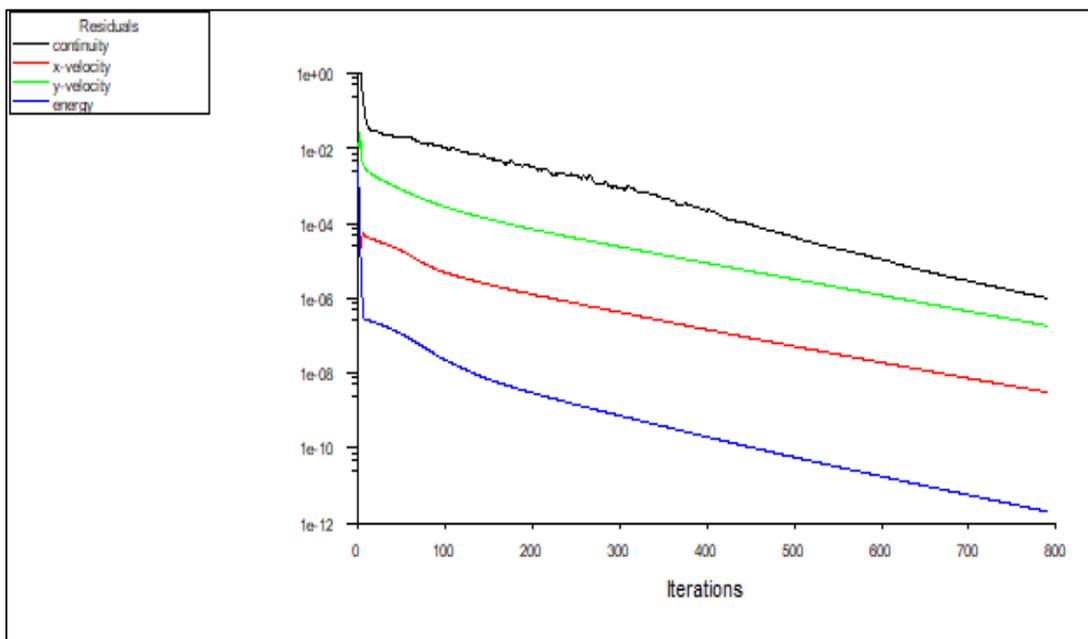


Figure III-16 : Evolution des résidus des équations de continuité, énergie et quantité de mouvement pour la convection mixte pour Re=300 et Ri=1.77

III.14 Conclusion :

Une fois la simulation achevée, après avoir atteint la convergence il nous reste qu'à extraire les différents résultats sous forme de courbes à partir des outils graphiques disponibles dans FLUENT qui nous permettent de traiter l'information contenue dans notre solution CFD et de visionner facilement nos résultats. Les fonctions que nous avons utilisées pour cette fin sont : Display et Plot.

Au cours de ce chapitre on a interprété la présentation du logiciel Gambit ainsi que, celle du code de calcul (Fluent) que nous avons utilisé pour la résolution numérique du problème. La procédure de résolution est aussi présentée. Et les résultats que nous avons obtenus ainsi que leur traitement feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus par la simulation numérique en utilisant le logiciel Fluent 6.3.26 relatif à la convection laminaire dans un canal vertical à plaques parallèles rempli d'un nanofluide (eau +TiO₂).

Les résultats présentés sont les contours de la température, de vitesses pour différentes fractions volumiques du nanofluide ainsi que des courbes graphiques tracées à l'aide du logiciel ORIGIN PRO 2018 afin de comprendre mieux ces derniers.

IV.2 L'effet du maillage sur les solutions numérique :

Différents maillages (nœuds) non uniformes sont pris en considération dans cette étude, pour examiner l'indépendance du maillage et pour assurer l'exactitude et de la solution numérique avant de passer aux calculs, nous avons choisir cinq maillages différents, 10×40, 15×60, 25×90, 35×100 et 40×120 nœuds.

Le test du maillage a été fait sur la température de sortie pour de nombre de Reynolds ($Re = 300$), et pour une fraction volumique du nanofluide (dioxyde de titane TiO₂ + eau) de 3%.

D'après le table IV-1, nous constatons que la température de sortie devient insensible au nombre de nœuds à partir de la grille 15×60, alors que l'écart entre les valeurs de la température de sortie pour les trois premiers maillages est légèrement différent. De ce fait, nous avons opté pour le maillage 25×90 nœuds pour tous nos calculs, pour obtenir d'une manière qualitative des résultats précis avec un minimum du temps de calcul.

Tableau IV-1 : Étude de l'indépendance du maillage pour un nano-fluide (dioxyde de titane TiO₂ + eau), avec $A = 50$, $\phi = 3\%$, $Gr = 1.59 \cdot 10^5$ et $Re = 300$.

Maillage (nœuds)	10×40	15×60	25×90	35×100	40×120
T_s	307.996	308,010	308,246	308,248	308,250

IV.3 Validation du code de calcul :

Les résultats du code (Fluent 6.3.26) ont été validés avec les résultats des travaux de (G.Desrayaud et Lauriat, 2009) pour un écoulement en convection mixte favorable entre deux plaques parallèles et verticales chauffées à une température constante avec $Pr = 0.7$, $Gr = 1.59 \times 10^5$, $Re = 300$ et une longueur $L = 50$. Le profil de la vitesse longitudinale et de la température dans différentes positions le long de la conduite sont présentés et comparés sur

la figure IV-1. Il est clair que nos résultats numériques sont en bon accord avec les résultats obtenus par (G.Desrayaud et Lauriat ,2009).

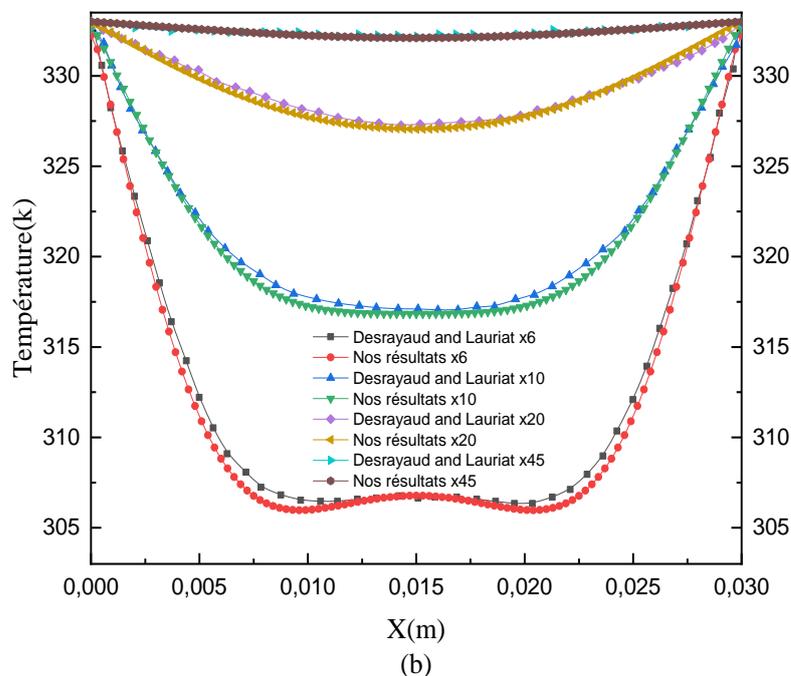
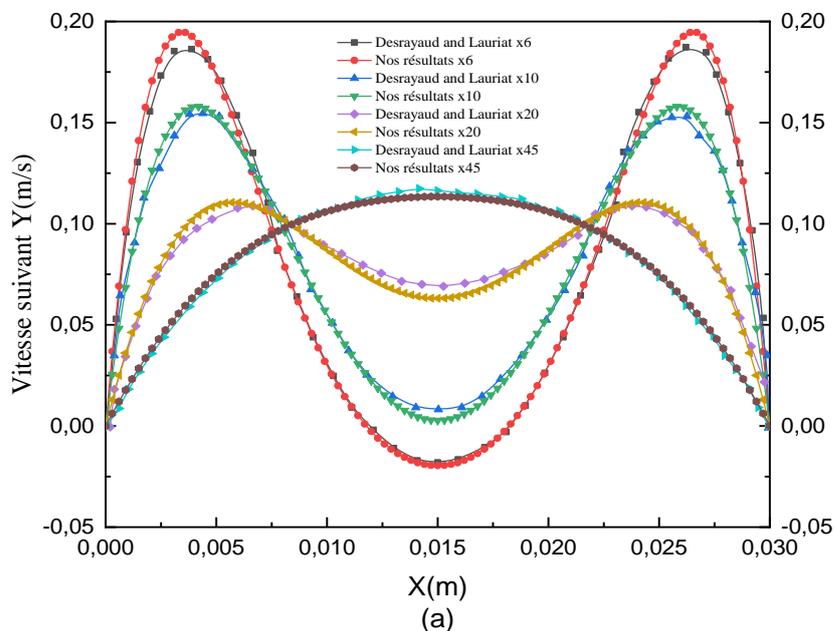


Figure IV-1 : Comparaison entre nos résultats numériques et ceux de (Desrayaud and Lauriat (2009), (a) Profils de température et (b) Profils de vitesse, en fonction de y , pour $Re = 300$ et $Gr = 1.59 \cdot 10^5$.

IV.4 Analyse des résultats :

Pour analyser nos résultats, On propose de choisir des sections suivant x et y Comme la montre la figure suivante:

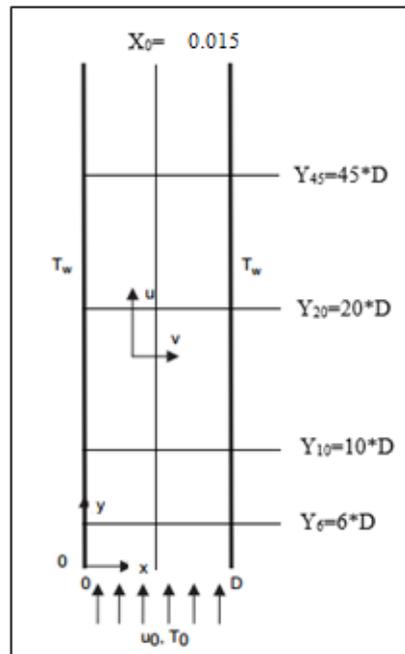


Figure IV-2 : Différentes sections choisies.

IV.5 Résultats et discussion :

Dans le but d'étudier la convection mixte dans un canal vertical avec un courant ascendant du nano-fluide (eau +TiO₂). Une simulation numérique a été effectuée, dans laquelle la fraction volumique des nanoparticules représente un facteur clé, pour différentes valeurs de nombres de Reynolds ($Re = 300, 800, 1000$ et 1500), de Grashof ($Gr = 10^5, 5 \cdot 10^5, 7.9 \cdot 10^5$ et 10^6) et des fractions volumiques des nanoparticules ($\phi = 0$ à $0,1$)

IV.5.1 Effet de la fraction volumique du solide:

Sur la figure IV-3, nous avons présenté l'influence de la fraction volumique ($\phi = 0\%$, $\phi = 3\%$, $\phi = 7\%$, $\phi = 9\%$) sur la pression dynamique à la sortie du canal, à des nombres de Reynolds et Grashof fixes ($Re=300$ et $Gr=1.59 \cdot 10^5$). Une vue rapprochée des profils de pression dynamique montre qu'une magnitude maximale de P correspond à une situation de $\phi = 9\%$ (0.09 Pa), tandis que la valeur minimale correspond à $\phi = 0\%$ (0.079 Pa) ainsi que, on constate qu'il y a une augmentation de la pression dynamique avec l'accroissement de la fraction volumique.

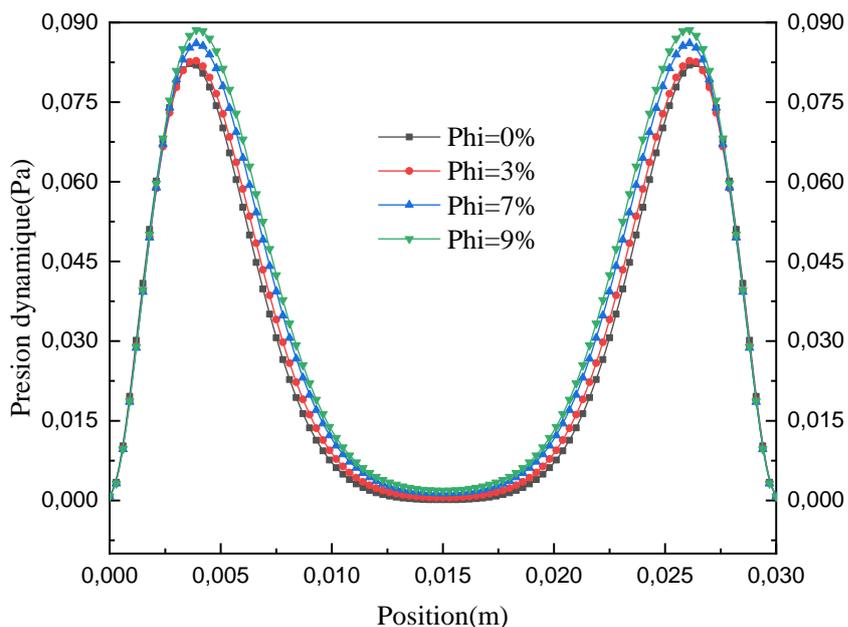


Figure IV-3 : Effet de différentes fractions volumiques sur la pression dynamique à la sortie du canal, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \cdot 10^5$

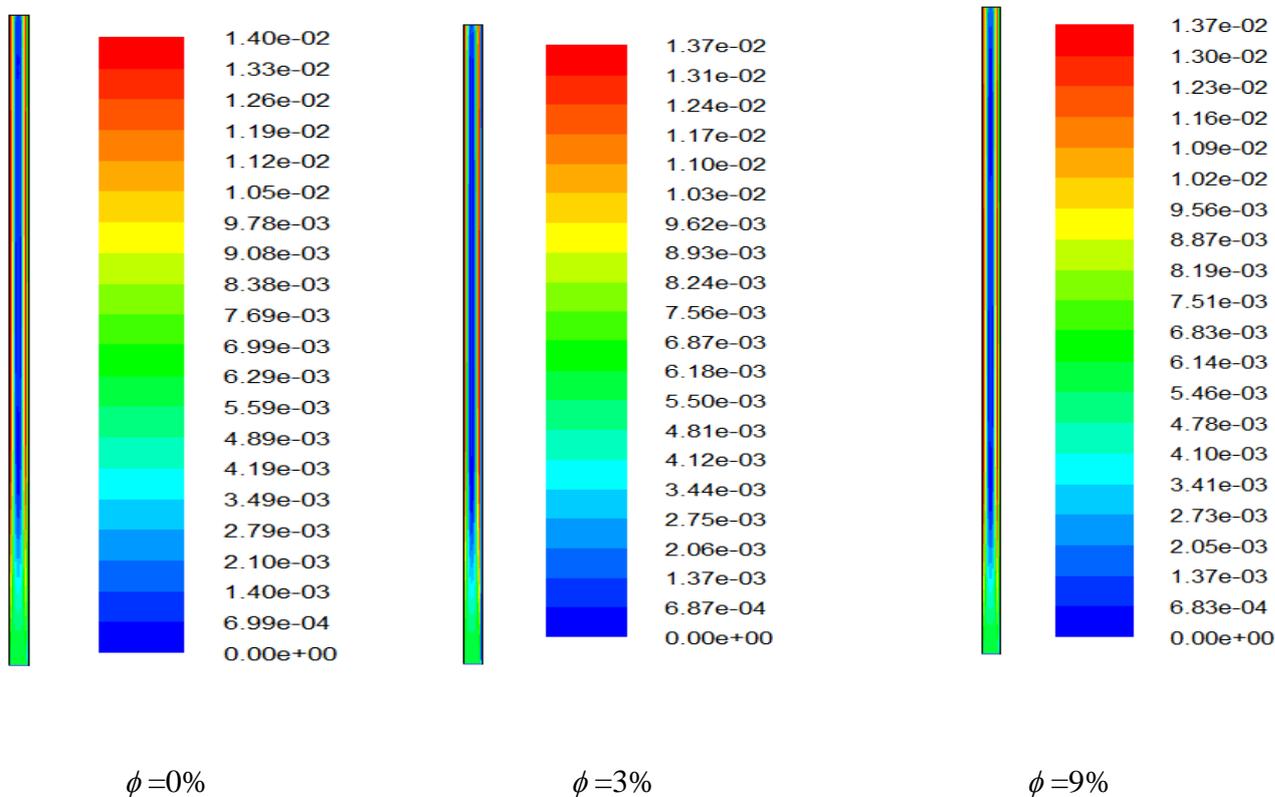


Figure IV-4 : Contour de la vitesse totale pour différents fractions volumiques, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \cdot 10^5$

La figure IV-4 illustre le contour de la vitesse résultante pour différentes fractions volumiques et ceci pour ($Re = 300$ et $Gr = 1.59 \times 10^5$). Ce résultat est prévu car la masse volumique du nano-fluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) est supérieur à celui de nano-fluide $\phi = 0\%$. En conséquence, la poussée d'Archimède qui agit sur le nano-fluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) est également inférieure à celle qui agit sur nano-fluide $\phi = 0\%$, donc la vitesse est réduite.

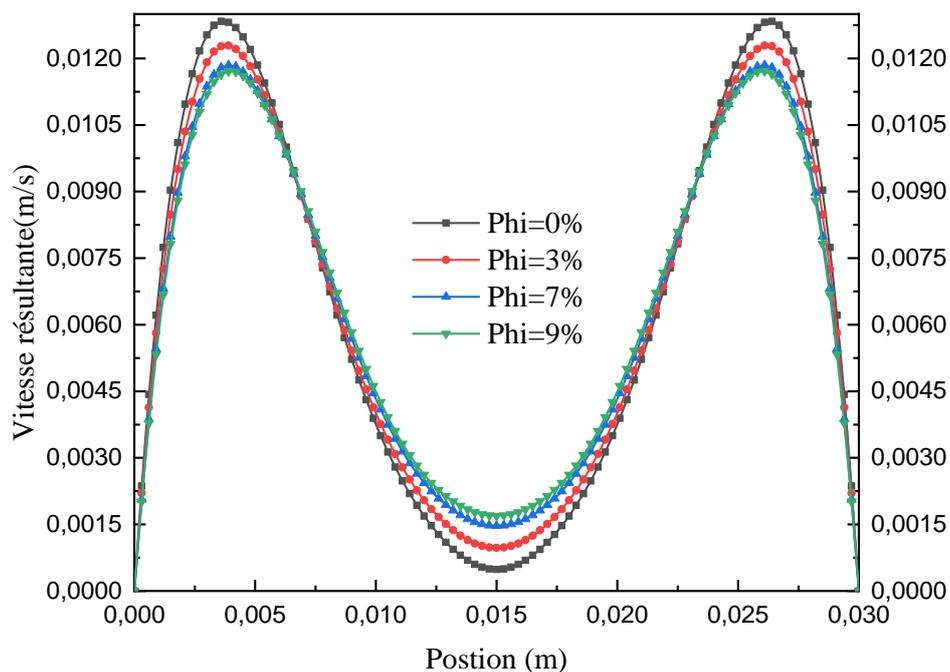


Figure IV-5 : Effet de différentes fractions volumiques sur la vitesse totale suivant Y à la sortie du canal, à $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \times 10^5$.

La figure IV-5 nous montre l'effet de fraction volumique sur la vitesse totale suivant Y à la sortie du canal, pour ($Re = 300$ et $Gr = 1,59 \times 10^5$), on observe que ces courbes ont même allure de la pression dynamique et ceci s'explique par la proportionnalité existante entre la pression dynamique et la vitesse résultante.

Nous voyons aussi que la vitesse est minimale près des parois jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur nulle à cause du frottement dans les trois cas $\phi = 0\%$, $\phi = 3\%$, $\phi = 7\%$ et $\phi = 9\%$ et elle atteint le maximum (0,0125, 0,0120, 0,0118 et 0,0117) pour ($\phi = 0\%$, $\phi = 3\%$, $\phi = 7\%$ et $\phi = 9\%$) respectivement dans les deux intervalles [0-0,005] et [0,025-0,03].

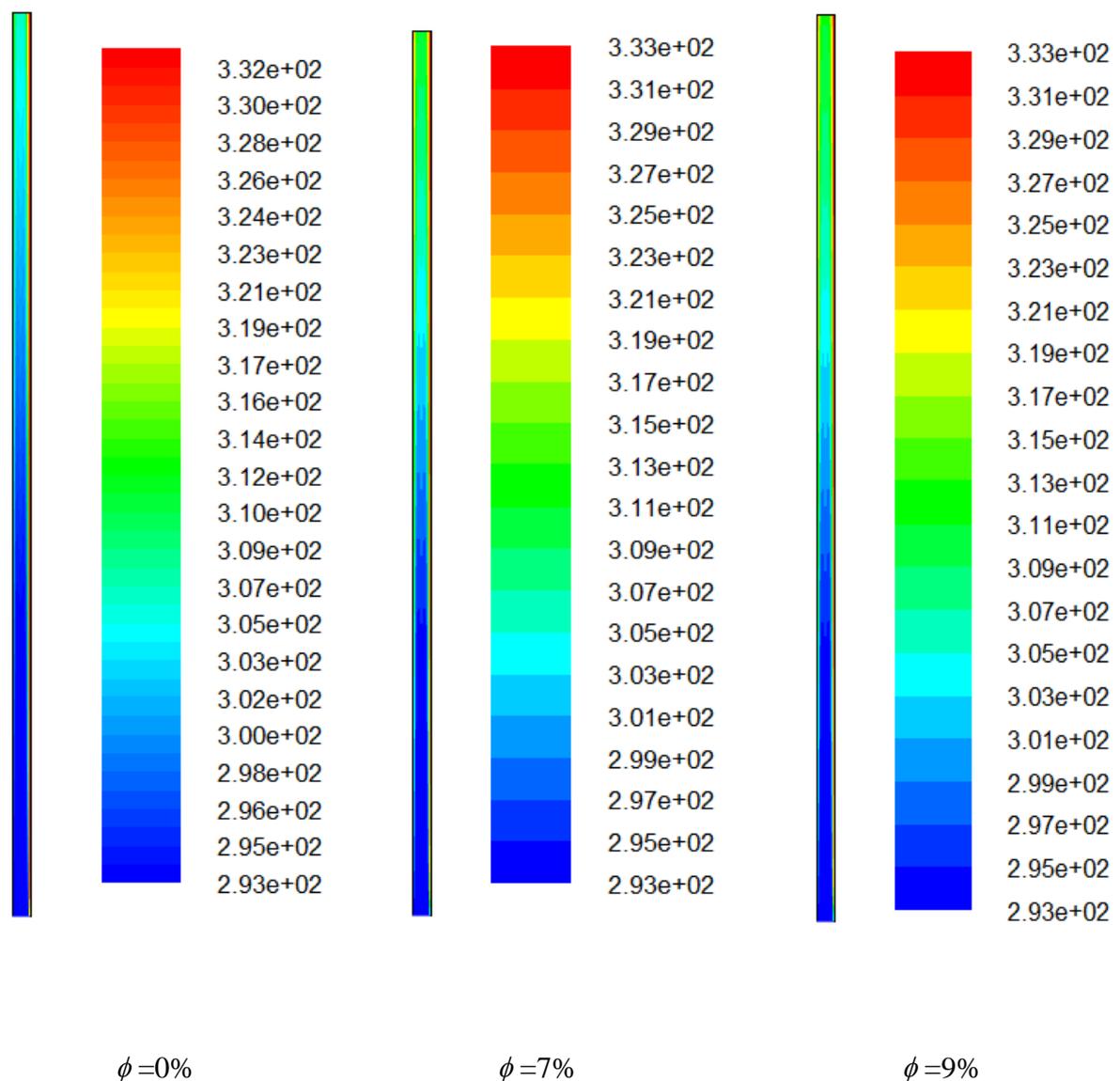


Figure IV-6 : Contour des températures totales pour différents fraction volumiques.

La figure IV-6 nous donne les contours des températures pour différentes fractions volumiques ($\phi = 0\%$, $\phi = 7\%$ et $\phi = 9\%$) et ceci pour ($Re = 300$ et $Gr = 1.59 \cdot 10^5$).

On sait que la densité et la viscosité du chaque nanofluide est supérieure à celle de l'eau pure, donc l'augmentation de la fraction volumique conduit à l'accroissement des propriétés thermo physique (ρ et μ) des nano-fluide. En outre, la conductivité thermique du nanofluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) est supérieure à celui de l'eau pure qui conduit à l'élévation de la température du nanofluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) par rapport à celle du fluide pure.

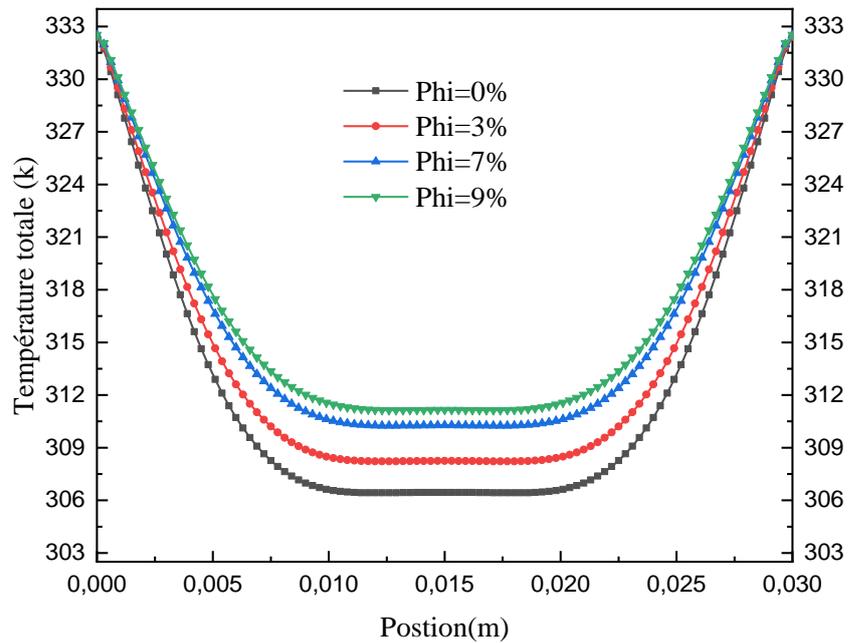


Figure IV-7 : Effet de fraction volumique sur la température totale à la sortie du canal, pour $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \cdot 10^5$.

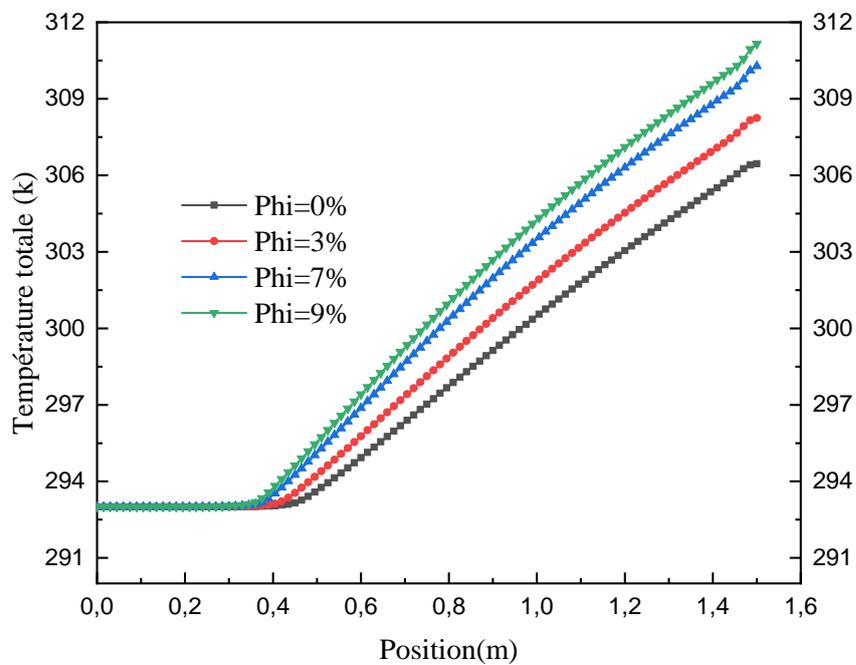


Figure IV-8 : Effet de fraction volumique sur la température totale à $(x=0.015)$ pour $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \cdot 10^5$.

La figure IV-7 montre l'influence de fraction volumique de nanoparticules sur la température totale suivant Y à la sortie du canal, pour $Re = 300$ et $Gr = 1,59 \times 10^5$, on observe que la fraction volumique a un effet significatif sur le profil de température. L'ajout de nanoparticules de TiO_2 augmente la conductivité thermique du nano fluide (dioxyde de titane $TiO_2 + eau$), ce qui se traduit par une meilleure diffusion de la chaleur au sein du nanofluide, et donc une augmentation de sa température.

La figure (IV-8), illustre le profil de la température totale dans le plan vertical ($X=0.015$) , pour un nombre de Reynolds ($Re=300$), Pour chaque valeur de fraction volumique , il est clair qu'à l'entrée du canal l'écoulement est à la température ambiante $T_0=293^\circ K$ et quand il s'approche à ($y=0.4$ m) ,la température va commencer à augmenter progressivement, à des degrés divers, selon la proportion de fraction volumique ,cela est dû à l'augmentation de caractéristique de nanofluide. Les valeurs de la température à la sortie pour chaque fraction volumique ($\phi =0\%$, $\phi =3\%$, $\phi =7\%$ et $\phi =9\%$) sont ($306^\circ K$, $308^\circ K$, $310^\circ K$ et $311.5^\circ K$) respectivement.

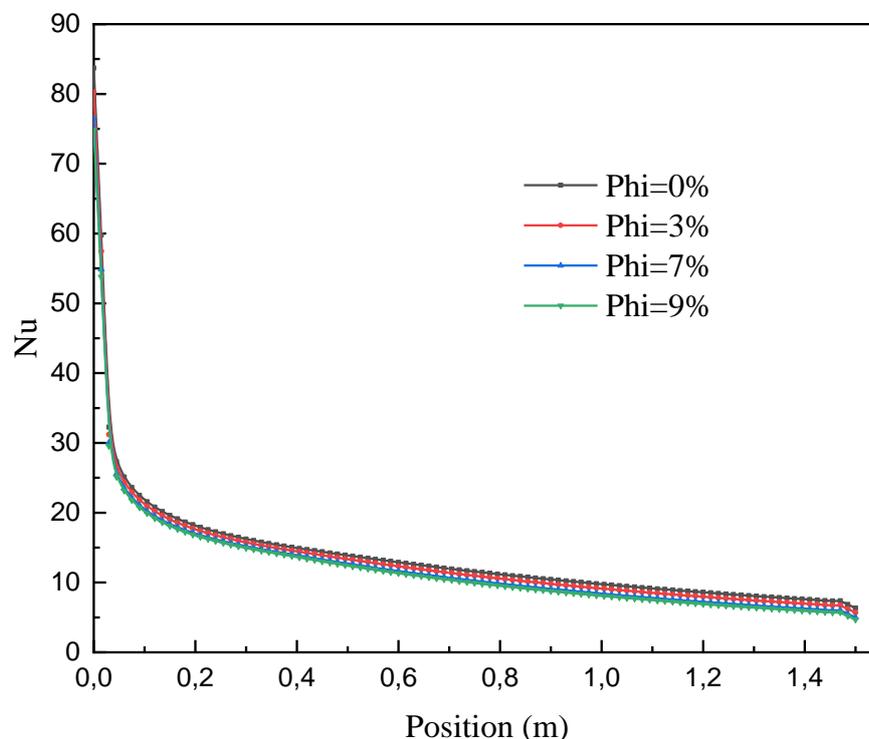


Figure IV-9 : Profil du nombre de Nusselt pour différentes valeurs de ϕ , pour ($Gr = 1.59 \times 10^5$ et $Re = 300$).

La figure IV-9 présente l'évolution du nombre de Nusselt pour les fractions suivantes ($\phi = 0\%$, $\phi = 3\%$, $\phi = 7\%$ et $\phi = 9\%$) dans un canal vertical en fonction de long de la paroi.

On constate que le nombre de Nusselt va diminuer avec l'accroissement de la fraction volumique, car l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) va favoriser le transfert convectif entre le fluide et les parois ce qui permet de donner plus de dissipation de la chaleur.

IV.5.2 Comportement dynamique et thermique du nanofluide dans un canal :

La figure IV-10 illustre les profils de vitesse pour $Re = 300$ et $Gr = 1,59 * 10^5$ et $Ri=1.77$.

Pour (y_6) c.à.d. près de l'entrée ($y=0.18\text{m}$), les deux maximums de vitesse symétriques se déplacent vers le centre diminuant leur force, Au fur et à mesure que elle va augmenter pour (y_{20}) et (y_{45}) (égalent à $0,6\text{ m}$ et à 1.35m respectivement), près de la sortie, le profil est caractérisé par un noyau de vitesse négative indiquant un écoulement inversé et des vitesses nulles près du mur à cause de la condition d'adhérence.

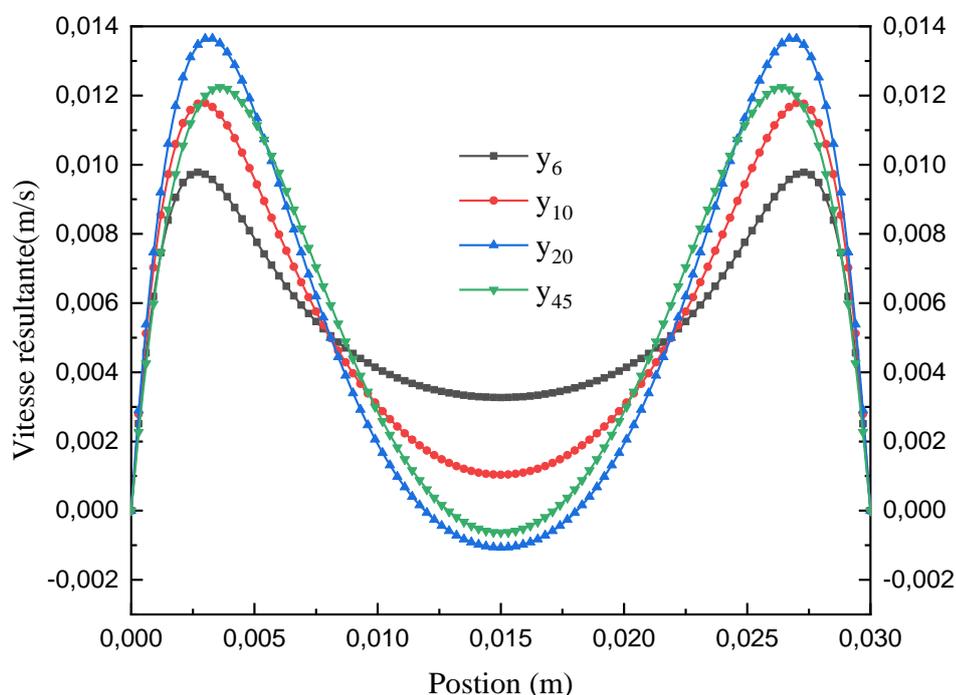


Figure IV-10 : Profil de la vitesse résultante suivant X pour $\phi = 7\%$, $Re=300$, $Gr=1.59*10^5$ et $Ri=1.77$

La figure IV-11 montre les profils de température totale pour $\phi = 7\%$, $Re=300$, $Ri=1.77$ et $Gr=1.59 \cdot 10^5$. Le flux inversé près de l'entrée du canal rend la température du nanofluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau) plus uniforme (profil x6) et, finalement, l'écoulement du nanofluide atteint un état isotherme. Les profils de température à la sortie du canal se rapprochent des conditions d'écoulement pleinement développées, c'est-à-dire la vitesse axiale, qui est invariant dans le sens de débit et le profil de température uniforme de 333k.

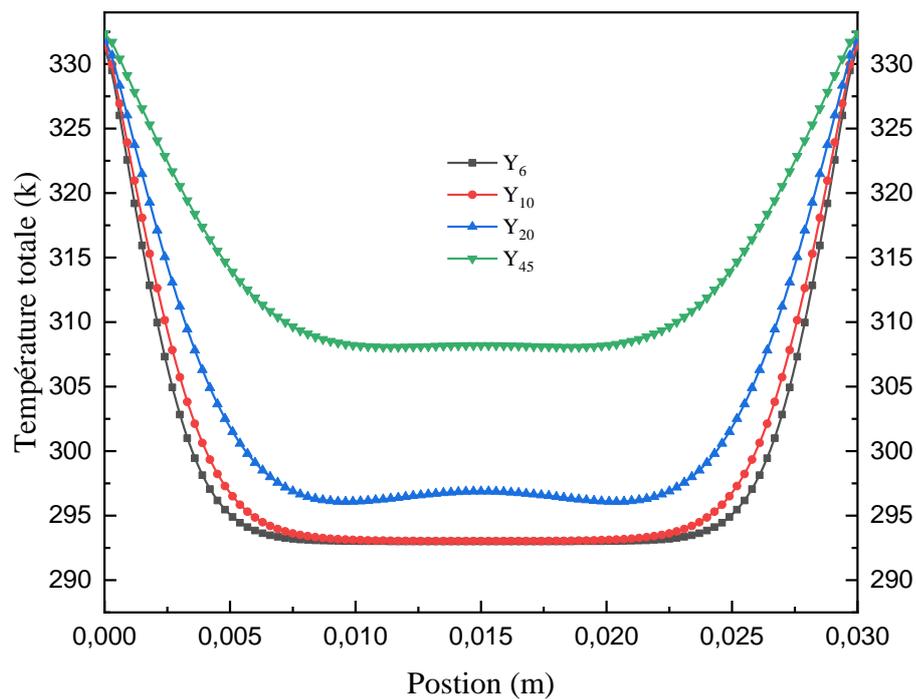


Figure IV-11 : Profil de la température totale suivant X pour $\phi = 7\%$, $Re=300$, $Gr=1.59 \cdot 10^5$ et $Ri=1.77$

IV.5.3 Effet du nombre de Reynolds :

La figure IV-12 nous montre l'effet du nombre de Reynolds sur les températures totales pour la fraction volumique ($\phi=9\%$) et pour un nombre de Grashof ($Gr=1.59 \cdot 10^5$), alors on peut remarquer que la température du fluide est diminuée avec l'augmentation du nombre de Reynolds, ainsi que on peut voir que le gradient de la température au sien de la paroi de canal pour l'écoulement du nanofluide est plus élevés.

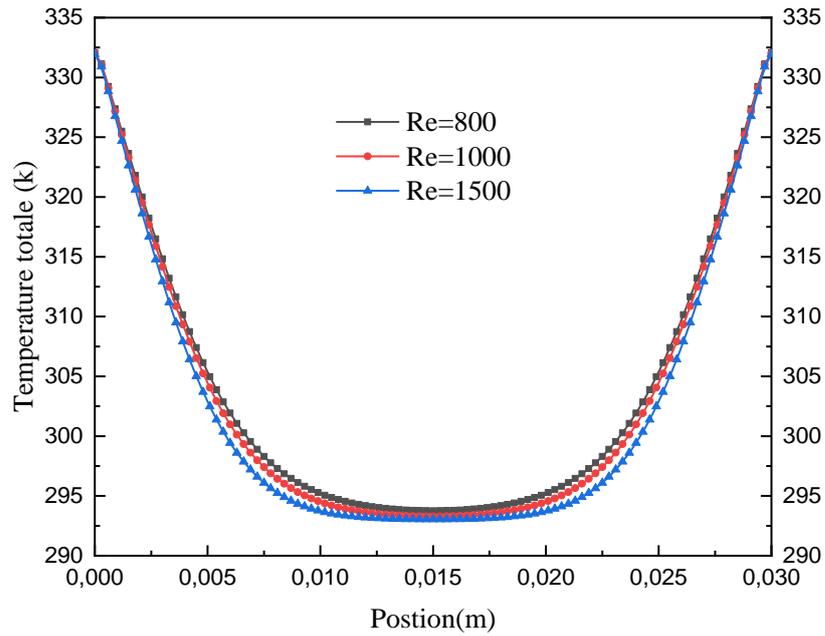


Figure IV-12 : Effet de nombres de Reynolds (Re) sur la température totale, pour $Gr = 1,59 \cdot 10^5$ et $\phi = 9\%$.

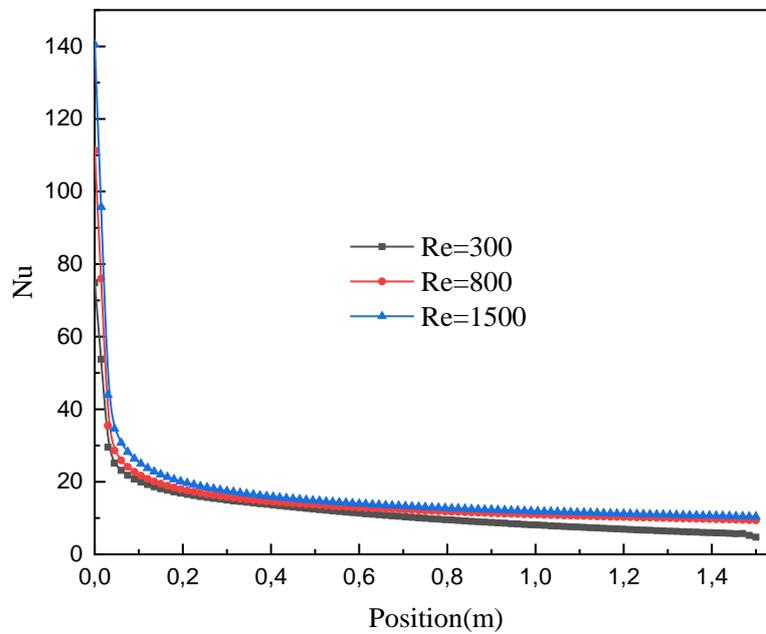


Figure IV-13 : Effet de nombres de Reynolds (Re) sur le nombre de Nusselt (Nu), pour $Gr = 1,59 \cdot 10^5$ et $\phi = 9\%$.

La figure IV-13 présente la variation du nombre de Nusselt le long de la paroi verticale pour différents nombres de Reynolds, et pour $\phi = 9\%$, $Gr = 1,59 \times 10^5$ et $Ri = 1.77$.

Il est à noter que, généralement à n'importe quel endroit le long de la paroi, le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds en raison de la forte convection à des vitesses d'écoulement plus élevées. L'écoulement est dominé par la convection naturelle dans les sections de sortie du canal où la vitesse d'écoulement est minimale.

IV.5.4 Effet du nombre de Grashof (Gr) :

La figure (IV- 14) présente la variation de la température totale pour différents nombres de Grashof Gr, et pour $Re = 1000$ et pour $\phi = 3\%$. Nous pouvons voir que la convection naturelle augmente l'efficacité du transfert de chaleur. Ceci est dû à une vitesse plus lente lorsque le nombre de Grashof est augmenté, provoquant l'extension de l'écoulement inverse dans les directions axiale et transversale. Ceci, à son tour, accélère l'écoulement de fluide le long de la paroi sur une plus longue distance et augmente ainsi l'efficacité du transfert de chaleur.

On observe que à proximité des parois chaudes du canal est augmentée par l'ajout des nanoparticules en raison de l'augmentation de la conductivité thermique du fluide, ce qui conduit à une augmentation de la température.

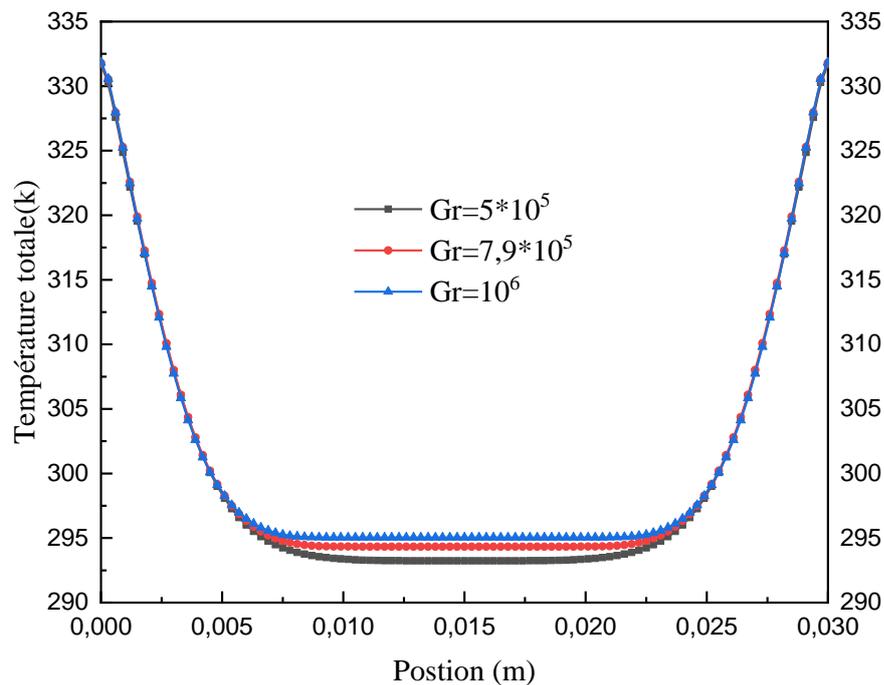


Figure IV-14 : Effet de nombre de Grashof (Gr) sur la température totale, pour $Re = 1000$ et $\phi = 3\%$.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié numériquement la convection mixte dans un canal vertical en utilisant le nanofluide (dioxyde de titane TiO_2 + eau).

Les résultats de la simulation numérique mènent aux conclusions suivantes :

- L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules fait à améliorer le transfert de chaleur.
- L'augmentation des nombres de Reynolds et de Grashof produit un taux de transfert de chaleur nettement plus élevé.
- Le type de nanoparticule est un facteur d'une importance capital pour le perfectionnement du transfert de chaleur. Nos résultats ont montrés que nanoparticule Cu entraine un transfert de chaleur bien élevé en comparaisant avec à celui dioxyde de titane TiO_2 + eau.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le présent travail, nous avons conduit une étude de transfert thermique et dynamique en convection mixte d'un nano-fluide dans un canal Vertical.

En premier lieu, nous avons effectué une recherche globale des notions de base essentielles sur la convection mixte, les nano fluides ainsi que sur recherche bibliographique.

En second lieu, nous avons étudié numériquement la convection mixte dans un canal vertical à plaques parallèles parcouru par un nano-fluide (dioxyde de titane TiO₂ + eau). Le logiciel **Fluent 6.3.26**, basé sur la méthode des volumes finis, a été utilisé pour résoudre les équations du modèle mathématique.

Une bonne concordance a été obtenue avec les résultats trouvés dans la littérature. Les effets de la fraction volumique solide du nano-fluide sur le transfert thermique ont été examinés en détail.

Cette étude nous a permis de déduire certains points importants qui sont comme suit :

- ❖ L'usage du nano-fluide présente un taux de transfert de chaleur bien meilleur que celui du fluide de base (eau).
- ❖ L'augmentation de la fraction volumique favorise d'avantage le transfert de chaleur, sachant qu'on ne peut pas l'augmenter indéfiniment, ce qui engendrera le phénomène de sédimentation.
- ❖ On voit que l'effet de dispersion thermique influe évidemment sur les distributions de température.
- ❖ Le type de nanoparticule est un facteur d'une importance capital pour le perfectionnement du transfert de chaleur. Nos résultats ont montrés que nanoparticule Cu entraine un transfert de chaleur bien élevé comparant à celui dioxyde de titane TiO₂ + eau.

Enfin, nous concluons que la présence des nanoparticules dans le fluide de base joue un important sur l'évolution du transfert de chaleur dans le canal.

Annexes

Annexes A

Les propriétés thermophysiques de l'air utilisées pour faire la validation, ont été programmées à l'aide de logiciel MAPLE.

```

> restart;
> T:=283; Tw:=333;L=1.5; Gr:=1.59*10^(5);Ri:=1.77;re:=300;V0:=0.0822;
      T := 283
      Tw := 333
      L = 1.5
      Gr := 1.5900000105
      Ri := 1.77
      re := 300
      V0 := 0.0822

> #Conductivité thermique
> lemda:=(1.5207*10^(-11)*T^(3))- (4.857*10^(-8)*T^(2))+ (1.0184*10^(-4)*T)-
(3.9333*10^(-4));
      lemda := 0.0248821367

> #Viscosité dynamique de l'air
> mu:=(8.8848*10^(-15)*T^(3))- (3.2395*10^(-11)*T^(2))+ (6.2657*10^(-
8)*T)+ (2.3543*10^(-6));
      μ := 0.0000176931235

> #viscosité cinématique
> nu:=(-1.363528*10^(-14)*T^(3))+ (1.00881778*10^(-10)*T^(2))+ (3.452139*10^(-8)*T)-
(3.400747*10^(-6));
      ν := 0.0000141392809

> #Chaleur spécifique de l'air
> Cp:=(1.9327*10^(-10))*T^(4)- (7.9999*10^(-7))*T^(3)+ (1.1407*10^(-3))*T^(2)-
(4.4890*10^(-1))*T+ 1.0575*10^3);
      Cp := 1004.92658

> #Masse volumique de l'air
> rhot:=(1.292*273.15)/T;
      rhot := 1.24703109

> #La diffusivité thermique
> d:=lemda/(rhot*(Cp/1.4));
      d := 0.0000277973945

> #Le nombre de Prandtl
> Pr:=mu*Cp/lemda;
      Pr := 0.714580515

> #Coefficient de dilatation
> beta:=evalf(1/T);

```

```

β := 0.00353356890
> #la pesanteur
> g0:=evalf((Gr*nu^(2))/(beta*(Tw-T)*0.03^(3)));
g0 = 6.663531230
> #Diamètre hydraulique
> dh:=re*nu/V0;
dh := 0.0516032150

```

Annexes B

Programme des caractéristiques thermophysiques du nano-fluide :

```

> restart;
> #pour l'eau
> rhothf:=997.1; Cpf:=4179; kf:=0.613;betaf:=21*10^(5);phi:=0.03;
rhothf := 997.1
Cpf := 4179
kf := 0.613
betaf := 2100000
φ := 0.03
> #pour nano-fluide
> rhots:=8933; Cps:=385 ; ks:=401;betas:=1.67*10^(5);
rhots := 8933
Cps := 385
ks := 401
betas := 1.6700000105
> #Fraction volumique
> #phi:=Vs/Vs+Vf;
> #Viscosité dynamique (Brinkman,1952)
> mu(nf):=mu(f)/((1-phi)^(2.5));
μ(nf) := 1.079122293μ(f)
> #conductivité thermique (k) (Maxwell,1954)
> k(nf):=(ks+2*kf+2*(ks-kf)*phi*kf)/(ks+2*kf+(ks-kf)*phi);
>
k(nf) := 1.00655330
> #capacité calorifique et le coefficient d'expansion thermique(Khanafer,2003)
> Cpnf:=((1-phi)*Cpf)+(phi*Cps);
Cpnf := 4065.18
> betanf:=((1-phi)*betaf)+(phi*betas);
betanf := 2.042010000106
> #masse volumique Gladés Bachir , 2010
> rohtnf:=((rohtf*Vf)+(rohts*Vs))/(Vf+Vs);
rohtnf :=  $\frac{rohtf Vf + rohts Vs}{Vf + Vs}$ 

```

Annexes C

Programme des nombres adimensionnels :

```

> restart;
> T:=293; Tw:=333;L=1.5; Gr:=1.59*10^(5);Ri:=1.77;mu:=0.00126969;beta:=1.92378*10^(-
5);roht:=1290.862;re:=300;dh:=0.5160321504e-1;
      T := 293
      Tw := 333
      L = 1.5
      Gr := 1.5900000105
      Ri := 1.77
      μ := 0.00126969
      β := 0.0000192378000
      roht := 1290.862
      re := 300
      dh := 0.0516032150.

> #viscosité cinématique
> nu:=mu/roht;
      ν := 9.83598556610-7

>
> #la pesanteur0.1923780000e-4
> g0=evalf((Gr*nu^(2))/(beta*(Tw-T)*0.03^(3)));
      g0 = 7.40378381.

>
> V:=(re*nu)/dh;
      V := 0.00571823997.

```

Référence bibliographique

Référence bibliographique

A

[Abbou Djamil et Aggoun Zahir, 2019]. *Investigation numérique d'un écoulement en convection mixte à travers un canal vertical rempli d'un nanofluide. Mémoire de master En Génie Mécanique Option : Energétique. Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa.*

[Akbari, M., Galanis, N., & Behzadmehr, A. (2012)]. Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 37, 136-146.

[A.Malvandi, D.D.Ganji ,2015] , *Effects of nanoparticle migration on hydromagnetic mixed convection of alumina/water nanofluid in vertical channels with asymmetric heating, Physica E 66., 181-196.*

[A.Giovannani et B.Bedat.] « *Transfert de chaleur* ». Livre, cepadué's-édition.

B

[Bachir, G. (2010)] *Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).*

[BAZIZI Rachida et HAMIMI Sofiane, 2018]. *Numerical investigation of forced convective cooling performance of two nanofluid types in microchannel.*

[Brinkman, H. C. (1952)]. *The viscosity of concentrated suspensions and solutions. The Journal of Chemical Physics*, 20(4), 571-571.

[Bachir, G. (2010)]. *Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).*

[Belmihoub Zohir et Mekhnache Riadh ,2017] *Effet de la dispersion thermique dans un milieu poreux non Darcéen en convection mixte et de masse simultanée. Mémoire de master En Génie Mécanique Option : Energétique. Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa.*

C

[Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995)]. *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles* (No. ANL/MSD/CP-84938 ; CONF-951135-29). Argonne National Lab., IL (United States).

D

[Desrayaud, G., & Lauriat, G. (2009)]. *Flow reversal of laminar mixed convection in the entry region of symmetrically heated, vertical plate channels. International Journal of Thermal Sciences*, 48(11), 2036-2045. [D.C.Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*], 3rd edn, vol 1, et 2, chap, 9, vol 1, article 314, Dover, New York, 1954.

[Dann, G. M. (1981)]. *Tourist motivation an appraisal. Annals of tourism research*, 8(2), 187-219.

[D.SrinivasaCharya, G.Swamy Reddy, 2016]. « *Chemical reaction and radiation effects on mixed convection heat and masse transfer over a vertical plate in power-law fluid saturated porous medium*». *Journal of the Egyptian mathematical society* 24, 108-115.

E

[E.Belahmadi, R.Bessaih, 2016], *Etude numérique de la convection mixte dans un canal vertical rempli d'un nanofluide, Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAEP2016, October 30-31, Constantine, Algeria.*

F

[Fohanno Stéphane t al ,2012] « *Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle* ».thèse université de Reins Champagne-Ardenne, France.

[Farhad Talebi, Amir Houshang Mahmoudi, Mina Shahi, (2010)]. «*Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid*», *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 79–90.

H

[Harnane, Y., & Bessaih, R. (2008)]. *Etude numérique de l'écoulement de la convection mixte turbulente dans un canal vertical muni de blocs chauffés (Comparaison entre deux modèles de turbulence)*. *Revue des Energies Renouvelables CISM*, 8, 165-174.

K

[Khentoul, M., & Bessaih, R. (2016)]. *Numerical Simulation of Nanofluid-Cooling Enhancement of Three Fins Mounted in a Horizontal Channel*. *Journal of Heat Transfer*, 138(9).

G

[Gambit 2.2.30 User's Guide, 2006].

[Gladés Bachir, 2010] *Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard*, thèse doctorat, Ecole doctorale Mécanique, Energétique et procédés(MEGeP), Unité de recherche : UFR MIG-UPS / IMFT, Université Toulouse.

H

[Hang Xu, Ioan Pop. (2012)] «Fully developed mixed convection flow in a vertical channel filled with nanofluids», *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 1086–1092.

I

[I. Pishkar, B. Ghasemi. (2012)] « Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection », *International Journal of Thermal Sciences* 59, 141-151,.

L

[Leleu, R. (1992)]. *Transferts de chaleur. Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, 1(J1080), J1080-1.

[Liang, G., & Mudawar, I. (2019)]. *Review of pool boiling enhancement by surface modification. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 892-933.

M

[Mina Shahi, Amir Houshang Mahmoudi, Farhad Talebi. (2010)] «Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid», *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 201–213.

[M. Rostamani, S.F. Hosseinizadeh , M. Gorji a, J.M. Khodadadi,(2010)] «Numerical study of turbulent forced convection flow of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties», *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 1426–1431.

[M.Benzema, Y.K.Benkahela, A.Boudiaf, S.Ouyahia], *Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag-MgO/Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique, a. Laboratoire des Phénomènes de transfert, FGMGP, USTHB, BP, 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie.*

N

[Nemati, H., Farhadi, M., Sedighi, K., Fattahi, E., & Darzi, A. A. R. (2010)]. *Lattice Boltzmann simulation of nanofluid in lid-driven cavity. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(10), 1528-1534.

O

[Ouadah Sabrina et Ould Amer Nassira,2018] *Simulation numérique d'un écoulement avec transfert de chaleur d'un nano fluide dans un dissipateur de chaleur. Mémoire de master En Génie Mécanique Option : Energétique. Université de M'sila.*

P

[Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1983)]. *A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. In Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion (pp. 54-73). Pergamon.*

R

[RIBIERO João-Paulo], *Nano-fluides pour les applications thermiques, Dossier Technique de l'ingénieur, nm5115, 2009.*

[Rana P,B hargava R, Bég O,2012]. *Numerical solution for mixed convection boundary layer flow of a nanofluid a long aninclined plate embedded in a porous medium. Comput Math Appl; 64:2816–32.*

[R.A. Mansour et R.A. Mohamed. (2010)] « *Numerical simulation of mixed convection flows in a square lid-driven cavity partially heated from below using nanofluid* », *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 1504–1512 .

S

[Strominger, J. L., Kalckar, H. M., Axelrod, J., & Maxwell, E. S. (1954)]. *Enzymatic oxidation of uridine diphosphate glucose to uridine diphosphate glucuronic acid. Journal of the American Chemical Society, 76(24), 6411-6412.*

[S.A. Shehzad, F.M. Abbasi, T. Hayat and F. Alsaadi 2014], *MHD mixed convective peristaltic motion of nanofluid with Joule heating and thermophoresis effects, PLOS ONE, Vol. 9.*

[S.Das, R.N.Jana, O.D.Makinde, Transient natural] *convection in a vertical channel filled with nanofluids in the presence of thermal radiation, Alexandria Engineering Journal. 2016, Vol. 55, pp. 253-262.*

[Salazar G.2006] *"Modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable : prise en compte de la pression du liquide"*, *Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers*

Référence bibliographique

[S.El Habib , 2013]. « *Application des nanofluides pour le refroidissement:étude d'un cas d'une géométrie simple* ». Mémoire Master Académique Université KASDI Merbah d'Ouargla.

[Saeed Mazrouei Sebdania, Mostafa Mahmoodia, Seyed Mohammad Hashemib(2011)] « *Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in a square cavity*», *International Journal of Thermal Sciences*, 1-15.

[SANDALI, M. (2014)]. *Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux (Doctoral dissertation)*.

Y

[Y.Boubaker et al ,2019] *Étude de la convection forcée dans un canal munie d'ailettes. Mémoire de master En Génie Mécanique Option : Energétique. Université de Tlemcen.*

[Yaiche Rafik et Mehdaoui Hamza 2013] *Etude de la convection mixte dans un canal horizontal contenant une alvéole en présence d'un nano-fluide. Mémoire de master En Génie Mécanique Option : Energétique. Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa.*

[Yuan Ma, Rasul Mohebbi, M.M. Rashidi, Zhigang Yang MHD] *convective heat transfer of Ag-MgO/water hybrid nanofluid in a channel with active heaters and coolers, International journal of Heat and Mass Transfer* 133, 2019, 714-726.

