



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université IBN KHALDOUN –Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème :

Effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité rectangulaire

Préparé par :

GUELLOULA Mohammed

MEDJEDOUB Abdelazziz

Soutenu publiquement le : 30 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. CHAIB Khaled	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. SAD CHEMLOUL N	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. KHALDI Sabrina	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BELMILOUD M.A	Maître Assistant "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Tout d'abord je remercie infiniment le bon Dieu tout-puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a données tout le long de mes études.

*On dit " merci, merci, merci " à notre respectueux encadreur Mr Dr **BELMILOUD Mohamed Amine** pour la disponibilité des encouragements et des aides constantes qu'une à permis d'amener bien ce travail.*

Je souhaite également à remercier :

*Monsieur **CHAIB KHALED**, monsieur **SAD CHEMLOUL Nord-Eddine** et madame **KHALDI Sabrina**, pour leur participation au jury de ce mémoire.*

Mes remerciements s'adressent également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin

Table des matières

	Page
Remerciements.....	i
Table des matières.....	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	iv
Nomenclature.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Étude bibliographique	
1.1.Échange thermique.....	3
1.2.Notions sur les modes de transfert.....	3
1.2.1. Conduction.....	3
1.2.2. Rayonnement.....	4
1.2.3. Convection.....	4
1.2.4. La convection naturelle.....	4
1.3.Régime d'écoulement.....	5
1.3.1. Régime laminaire.....	5
1.3.2. Régime turbulent.....	6
1.4.Nombres adimensionnelles.....	6
1.4.1. Nombre de Reynolds.....	6
1.4.2. Nombre de Prandtl.....	6
1.4.3. Nombre de Grashof.....	6
1.4.4. Nombre de Nusselt.....	7
1.5.Généralité et définition desnanofluides.....	7
1.5.1. Préparation de nanofluides.....	7
1.5.2. Les applications de nanofluides.....	8
1.5.3. Les avantages et les inconvénients des nanofluides.....	8
1.5.3.1.Les avantages	8
1.5.3.2.Les inconvénients.....	8
1.6.Les paramètres thermo-physiques des nanofluides.....	8
1.6.1. Viscosité dynamique.....	8
1.6.1.1.Modèle d'Einstein.....	9

1.6.1.2. Modèle de Brinkman	9
1.6.2. Masse volumique	9
1.6.3. Conductivité thermique.....	9
1.6.4. Chaleur spécifique.....	10
1.6.5. Coefficient de dilatation thermique.....	10
1.7. Revues bibliographiques.....	10
1.8. Conclusion.....	12

Chapitre 02 : Formulation mathématique

2.1. Introduction.....	14
2.2. Description du problème.....	14
2.3. Hypothèse simplificatrices.....	15
2.4. Approximation de BOUSSINESQ-OBERBECK.....	15
2.5. Les équations gouvernantes.....	16
2.5.1. Équation de continuité.....	16
2.5.2. Équation de quantité de mouvement.....	16
2.5.3. Équation d'énergie.....	16
2.5.4. Nombre de Nusselt.....	16
2.6. Conditions aux limites.....	16
2.7. Nombre de Nusselt moyen	17
2.8. Conclusion	17

Chapitre 03 : Méthode numérique

3.1. Introduction.....	19
3.1.1. Méthodes des différences finies.....	19
3.1.2. Méthodes des volumes finis.....	19
3.1.3. Méthodes des éléments finis.....	20
3.2. Maillages.....	20
3.2.1. Le domaine de calcul.....	21
3.3. Structure du code fluent.....	22
3.4. Conclusion.....	22

Chapitre 04 : Résultats et discussions

4.1.Introduction.....	24
4.2.Maillage du domaine.....	24
4.3.Validation numérique.....	25
4.4.Résultats et discussions.....	25
4.4.1. Les lignes de courant et les lignes isothermes.....	25
4.4.2. Variation du nombre de Nusselt moyen.....	36
5. Conclusion	38
Conclusion générale	40
Liste des références	42
Résumé	

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

	Page
Figure 1.1 Les modes du transfert thermique	3
Figure 1.2 Schéma de transfert de chaleur par convection libre.....	5
Figure 1.3 Ecoulement laminaire.....	5
Figure 1.4 Ecoulement turbulent.....	6
Figure 2.1 Représentation schématique du problème.....	14
Figure 3.1 Types de maillage utilisé par "FLUENT.....	21
Figure 3.2 Domaine de calcul.....	21
Figure 3.3 Structure de base du code FLUENT.....	22
Figure 4.1 Le maillage 67X80 utilisé dans cette simulation.....	24
Figure 4.2 Validation thermique du code de Nombre de Nusselt local	25
Figure 4.3 Lignes de courant et lignes isothermes pour nanofluide Cu + eau (), eau pure (- ----) et pour $Gr = 10^5$, $\phi = 0,04$	26
Figure 4.4 Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Cu + eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$	28
Figure 4.5 Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de TiO_2 + eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$	30
Figure 4.6 Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Al_2O_3 + eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$	31
Figure 4.8 Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Cu + eau en fonction de la fraction volumique de nanoparticule ϕ pour $Gr = 10^5$ et $A = 1,5$..	34
Figure 4.9 Variation des lignes de courant et les lignes isothermes du nombre de Grashof $Gr = 10^5$ en fonction des différents nanofluides pour $\phi = 0,04$ et $A = 1,5$	35
Figure 4.10 Influence de la nature du nanofluide sur l'amélioration de transfert pour $\phi = 0,04$ a) paroi horizontale inférieure et b) paroi verticale droite.....	37
Figure 4.11 Influence de rapport d'aspect sur l'amélioration de transfert pour nanofluide Al_2O_3 +eau, $\phi = 0,04$ et pour la paroi verticale droite.....	38

Liste des tableaux

	Page
Tableau 2.1 Propriétés thermo-physiques du fluide pur et des nanoparticules.....	15
Tableau 4.1 Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ TiO ₂ , Gr = 10 ⁴ , φ = 0.03, A=1 et pour paroi inférieur chaude.....	24

Nomenclatures

Symbole	Définition	Unité
A	Le rapport d'aspect	[-]
C _p	chaleur spécifique massique	[J/KgK]
g	accélération de la gravité	[m/s ²]
Gr	nombre de Grashof	[-]
h _c	coefficient local d'échange convectif	[W/m ² K]
H	Hauteur de la cavité	[m]
L	langueur de la cavité	[m]
m	La masse	[kg]
Nu	nombre de Nusselt.	[-]
P	Pression	[N/m ²]
Pr	nombre de Prandtl.	[-]
Q	Quantité de chaleur	[W]
Re	nombre de Reynolds	[-]
S	Surface	[m ²]
T	Température	[K]
T ₀	température de référence	[k]
u, v	Les composantes de la vitesse horizontale et verticale.	[m/s]
V	Volume	[m ³]
x, y	Coordonnées cartésien.	[m]
Symboles grecs		
α	Diffusivité thermique.	[m ² /s]
β	Coefficient de dilatation thermique.	[1/k]
λ	conductivité thermique.	[w/mk]
μ	viscosité dynamique	[Kg/ms]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
φ	la fraction volumique des nanoparticules	[-]
ρ	masse volumique	[Kg/m ³]
ρ ₀	masse volumique de référence	[Kg/m ³]
∇	Gradient	[-]
Cu	Cuivre	[-]
Al ₂ O ₃	oxyde d'aluminium	[-]

TiO ₂	dioxyde de titane	[-]
------------------	-------------------	-----

Indices et exposants

e,w,n,s	L'interface (est, west, nord, sud)
moy	valeur moyenne
*	valeurs adimensionnelles
F	Paroi froide
C	Paroi chaude
f	Fluide
nf	Nanofluide
p	Nanoparticule

Introduction
générale

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. Les écoulements de convection naturelle en espace confiné sont présents dans de nombreux phénomènes naturels et processus industriels ; le refroidissement des circuits électroniques, des réacteurs nucléaires, la thermique du bâtiment, les systèmes thermiques solaires,... etc.

Plusieurs études numériques et expérimentales, ont été concentrées sur la convection naturelle dans les cavités rectangulaires, vue leurs simplicités géométriques et leurs présences dans plusieurs applications industrielles. Les études réalisées, ne concernent pas seulement le régime laminaire, mais s'étalent au régime turbulent, qui est le régime d'écoulement le plus souvent rencontré dans la nature. Plusieurs travaux expérimentaux ont été utilisés pour valider les modèles numériques de turbulence dans les cavités.

L'objectif du travail, concerne l'effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité rectangulaire. La paroi verticale gauche et la paroi horizontale supérieure sont à la température $T_F < T_C$, l'espace restant des parois formant la cavité est supposé adiabatique. La simulation est effectuée à l'aide du code de calcul "FLUENT" qui est basé sur la méthode de volume finis.

Ce travail comporte quatre chapitres, dans le premier chapitre, nous avons présenté une introduction sur les modes de transfert de chaleur, les nombres adimensionnels caractérisant la convection, Définition et les paramètres thermo-physiques des nanofluides et les différents travaux antérieurs expérimentaux et numériques réalisés dans ce domaine.

Le deuxième chapitre traite la modélisation mathématique du phénomène physique à étudier en l'exprimant sous forme d'équations mathématiques, à savoir l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement, l'équation d'énergie. Les équations de relatives au modèle considéré combinées avec l'approximation de Boussinesq.

Le troisième chapitre traite de la génération du maillage, et de la transformation du domaine physique en modèle mathématique, ainsi que des méthodes numériques. Ce chapitre traite aussi la discrétisation numérique de l'équation générale de transport,

L'analyse de l'effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité rectangulaire est représentée dans le quatrième chapitre qui sera consacré à des simulations numériques des écoulements bidimensionnels et laminaires par convection naturelle Enfin, cette étude se termine par une conclusion générale.

Chapitre01 :

Etude bibliographique

1.1. ÉCHANGE THERMIQUE

Le transfert de chaleur entre des parois et un fluide est un processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur grâce au gradient de températures qui peut exister entre ces deux milieux.

Les trois modes du transfert thermique sont :

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

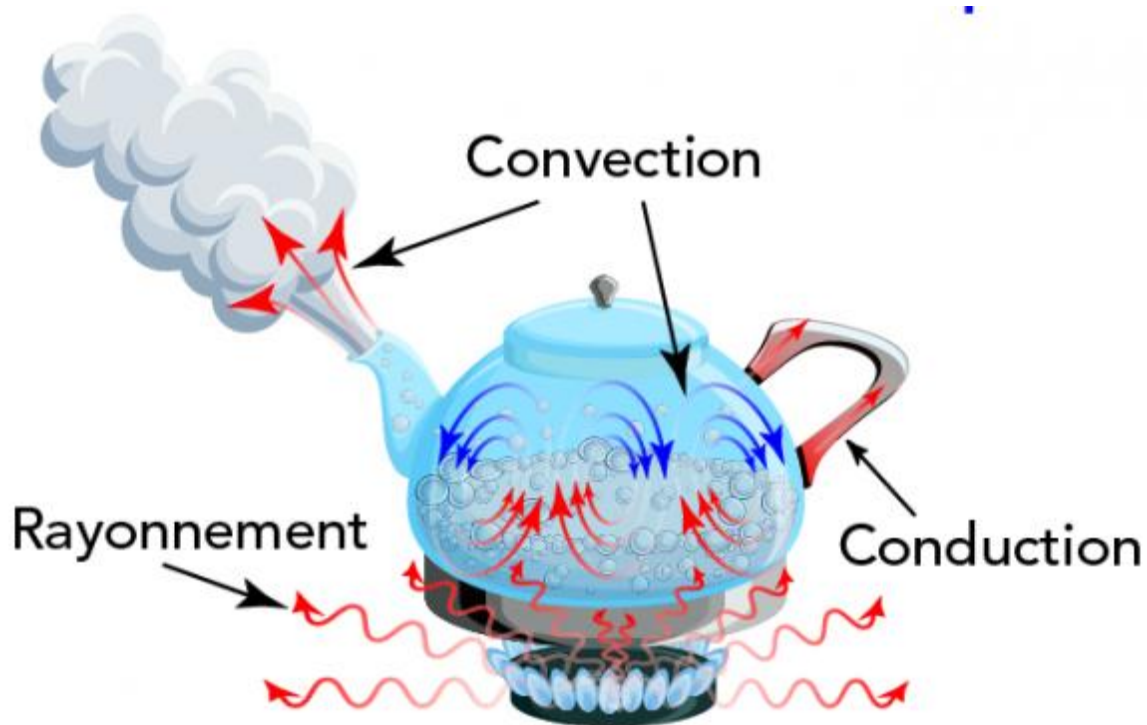


Figure 1.1 : Les modes du transfert thermique

1.2. NOTIONS SUR LES MODES DE TRANSFERT

1.2.1. Conduction

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les

métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur.

1.2.2. Rayonnement

Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse.

1.2.3. Convection

La convection est un mode de transfert d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. Elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transport 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, simultanément, 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.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre, convection forcée et convection mixte [1-6]

On a trois types de Convection:

- Convection forcée.
- Convection naturelle.
- Convection mixte.

1.2.4. La convection naturelle

La convection libre ou naturelle est la forme d'échange convectif la plus couramment observée : au contact d'un corps chaud, la température de l'air augmente, donc sa masse volumique diminue, exerce une poussée d'Archimède vers le haut, la masse d'air chaud s'élève en enlevant de la chaleur au corps, elle est remplacée par une masse d'air froid qui, au contact au corps, s'échauffe et ainsi desuite.

Le même phénomène peut s'observer pour des corps froids, le mouvement se faisant alors en sens inverse.

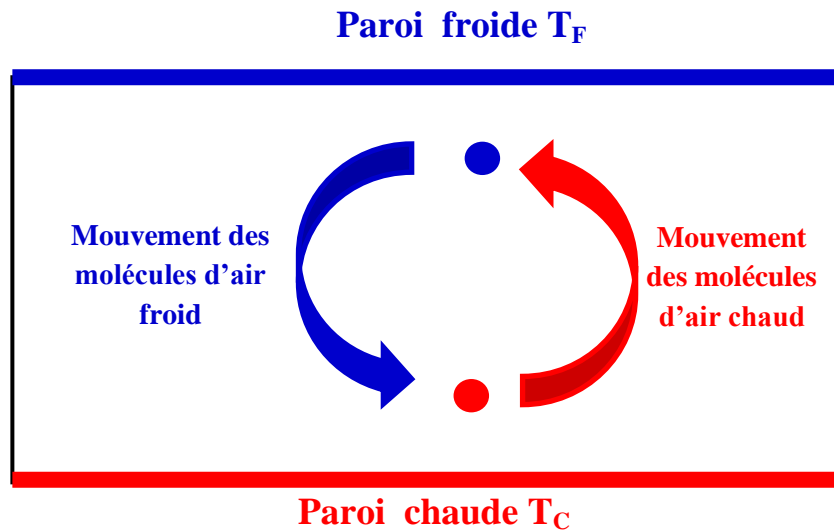


Figure .1.2 : Schéma de transfert de chaleur par convection libre

1.3. REGIME D'ÉCOULEMENT

Compte-tenu du lien entre le transfert de quantité de mouvement et le transfert de chaleur, on doit considérer le régime d'écoulement. Considérons l'exemple d'écoulement d'un fluide dans une conduite :

1.3.1. Régime laminaire

L'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes.

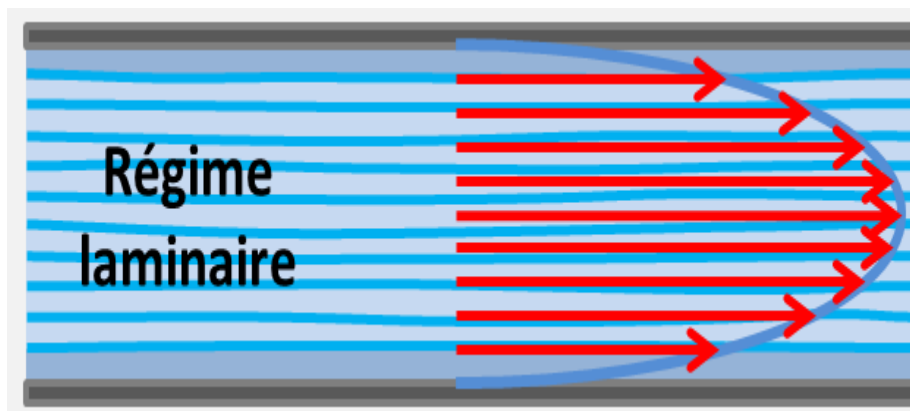


Figure. 1.3 : Ecoulement laminaire

Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc : Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.

Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

1.3.2. Régime turbulent

L'écoulement n'est pas unidirectionnel

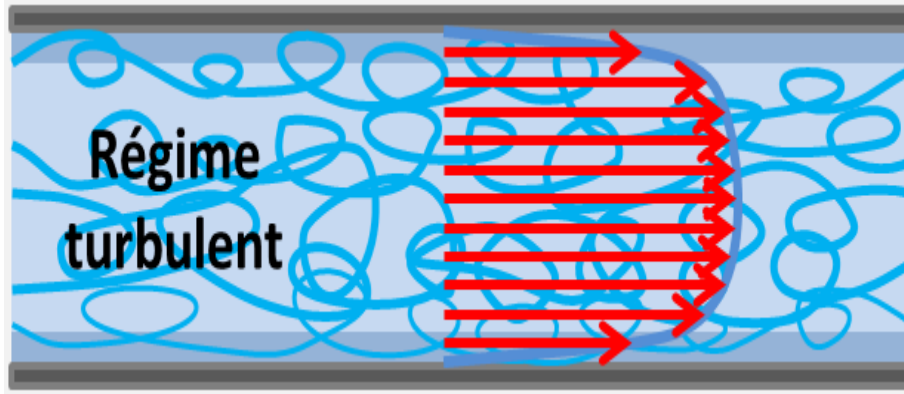


Figure. 1.4 : Ecoulement turbulent

L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable. Par rapport à la convection.

1.4. NOMBRESADIMENSIONNELLES

La résolution des équations gouvernante adimensionnelle fait apparaître des nombres sans dimensions très utiles dans l'étude de la mécanique des fluides et en particulier dans les phénomènes convectifs :

1.4.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds Re permet de déterminer le régime d'écoulement, laminaire, transitoire ou turbulent. Il est défini comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il s'exprime comme suit :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot H}{\mu} \quad (1.1)$$

1.4.2. Nombre de Prandtl

Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement ν (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique α . Il s'exprime comme :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.2)$$

1.4.3. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof Gr est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de

gravité sur les forces visqueuses. Il s'exprime comme suit :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu^2} \quad (1.3)$$

1.4.4. Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt représente également le rapport entre le transfert de chaleur par convection et celui par conduction, il est donné par:

$$Nu = \frac{h_c \cdot H}{\lambda} \quad (1.4)$$

1.5. GENERALITE ET DEFINITION DES NANOFUIDES

Les nano fluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle liquide de base. La liste des nanoparticules utilisées pour obtenir des nanofluides est très large on peut citer parmi eux [7]:

- l'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 .
- le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre, CuO.
- l'or, Au.
- l'argent, Ag.
- les nanotubes de carbone.
- le dioxyde de titane, TiO_2 .

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

- l'eau.
- l'éthylène glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène.

1.5.1. Préparation de nanofluides

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories [7] :

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique. Par contre pour les nanofluides il existe deux procédés distincts

1.5.2. Les applications de nanofluides[7]

Les applications sont :

- Le transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique)
- Le refroidissement électroniques
- L'espace
- Le refroidissement des systèmes nucléaires
- L'échangeur de chaleur
- La biomédecine
- Les autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs, réfrigérateurs domestiques, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique,...).

1.5.3. Les avantages et les inconvénients des nanofluides [7]**1.5.3.1. Les avantages**

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Une haute dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules.
- Les propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

1.5.3.2. Les inconvénients

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Me manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- Une mauvaise caractérisation dessus pensions.
- Une viscosité supérieure, et une basse chaleur spécifique.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Les difficultés dans le processus de production.

1.6. LES PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES DES NANO FLUIDES**1.6.1. Viscosité dynamique**

La viscosité peut être définie comme étant la propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nano fluide qui peut être influencée énormément par la qualité de la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base et de la température, cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et de la fraction volumique du nano fluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

1.6.1.1. Modèle d'Einstein [8]

Le modèle de viscosité utilisé est basé sur la fraction volumique. Einstein [8], a déterminé la viscosité de nanofluide d'une suspension de particules solides sphériques dont la fraction volumique est inférieure à 0,05 ($\varphi < 0,05$), par la relation:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\varphi) \quad (1.5)$$

Avec φ la fraction volumique du nano fluide.

1.6.1.2. Modèle de Brinkman [9]

Brinkman a généralisé la formule de laquelle pour qu'elle puisse être utilisée dans une large plage de concentrations volumiques :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2,5}} \quad (1.6)$$

1.6.2. Masse volumique

La détermination de la masse volumique d'un nano fluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique φ à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange. Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} \quad (1.7)$$

À partir de là on déduit alors la masse volumique du nanofluide **Ho et al[10]** :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi \rho_p \quad (1.8)$$

1.6.3. Conductivité thermique

La conductivité thermique du nano fluide est déterminée à partir de [10,11]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\varphi(\lambda_p - \lambda_f)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \varphi(\lambda_p - \lambda_f)} \quad (1.9)$$

1.6.4. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène est donnée par :

$$C_p = \frac{dQ}{m.dT} \quad (1.10)$$

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivants :

Modèle du **Hwang et al [12]**, ont Utilisé une expression plus simple donnée par:

$$(C_p)_{nf} = (1-\phi)(C_p)_f + \phi (C_p)_p \quad (1.11)$$

Modèle du **Pak et Cho[13]**, ont utilisé la formule suivante :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_p \quad (1.12)$$

1.6.5. Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique du nanofluide est déterminé par l'expression [10,12]:

$$\beta_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi (\rho\beta)_p}{\rho_{nf}} \quad (1.13)$$

1.7. REVUES BIBLIOGRAPHIQUES

Dans différentes situations physiques et applications technologiques, la convection naturelle dans une cavité rectangulaire joue un rôle important. L'étude d'un tel phénomène, dont l'importance est dictée par le rôle qu'il joue dans divers secteurs industriels, a une masse importante de publications spécialisées qui s'est accumulée au fur des années. Il existe plusieurs méthodes utilisées pour étudier le problème de la convection naturelle dans les cavités :

Oztop et al [14], ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire partiellement chauffée sur une face et refroidit sur la face en regard et contenant des nanofluides, les autres parois étant isolées. Ils ont utilisé la méthode des volumes finis pour la résolution des équations de transport de la chaleur et de la quantité de mouvement. L'étude a mis en évidence l'effet du nombre de Rayleigh, de la longueur de l'élément chauffant et sa localisation, du rapport d'aspect de la cavité et de la fraction volumique sur la structure de l'écoulement en général et le transfert de chaleur en particulier. Le choix du type de nanoparticule a été déterminant, à savoir le cuivre, de même l'augmentation de la fraction volumique et la taille de l'élément chauffant favorisent le transfert de chaleur et en dernier lieu il faut noter que l'amélioration des transferts thermiques est directement liée à la diminution du rapport d'aspect favorisant ainsi le mouvement de flottabilité.

Lage et Bejan [15] ont étudié numériquement et théoriquement la convection naturelle dans une cavité carrée refroidie isothermiquement sur un côté vertical alors que la paroi opposée est chauffée par un flux thermique pulsatoire. Ils ont montré que, pour une fréquence qui impose le flux de chaleur pulsé, la convection naturelle induite dans la cavité entre en résonance avec la température aux limites. Cette résonance est caractérisée par des fluctuations maximales du taux de transfert de chaleur à travers un plan vertical passant par le centre géométrique de la cellule. Ils ont observé également, en se basant sur les résultats numériques, que le phénomène de résonance existe dans la marge $[0,01 - 7]$ du nombre de Prandtl et qu'il s'amplifie à mesure que le nombre de Rayleigh augmente.

Lakhal et al [16], ont étudié numériquement l'effet d'un chauffage variable sur la convection naturelle transitoire conduite dans une cavité carrée chauffée partiellement par le bas. L'effet de plusieurs paramètres dominants, à savoir: la position et la longueur de l'élément chauffant, l'amplitude et la période de la température excitatrice et le nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur et sur l'écoulement du fluide est analysé. Les conclusions principales concernent la période et l'amplitude de la quantité de chaleur qui quitte le système à travers sa paroi froide.

Kazmierczak et Chinoda [17], ont étudié la convection naturelle transitoire dans une cavité carrée due à une variation sinusoïdale de la température d'une paroi verticale chaude. La paroi opposée (froide) est maintenue à une température constante constamment inférieure à celle de la paroi verticale. Ils ont analysé les effets de la période et l'amplitude de la température oscillante à travers la paroi froide de la cavité. Toutes les solutions transitoires obtenues sont périodiques dans le temps, et montrent que, malgré la dépendance des conditions aux limites vis-à-vis du temps et les variations notables des champs d'écoulement et de température, le transfert de chaleur moyen (dans le temps) évalué sur un cycle est approximativement égal à la valeur obtenue lorsque la paroi chaude est maintenue à une température constante a une variation sinusoïdale de la température d'une paroi verticale chaude. La paroi opposée (froide) est maintenue à une température constante constamment inférieure à celle de la paroi verticale. Ils ont analysé les effets de la période et l'amplitude de la température oscillante à travers la paroi froide de la cavité. Toutes les solutions transitoires obtenues sont périodiques dans le temps, et montrent que, malgré la dépendance des conditions aux limites vis-à-vis du temps et les variations notables des champs d'écoulement et de température, le transfert de chaleur moyen (dans le temps) évalué sur un cycle est approximativement égal à la valeur obtenue lorsque la paroi chaude est maintenue à une température constante.

Aminossadati [18] a étudié la magnétohydrodynamique d'un nano fluide, Cu-eau, à l'intérieur d'une cavité triangulaire. Il a observé que l'augmentation du nombre de Rayleigh engendre une intensification des courants convectifs. Il a remarqué également que l'augmentation du nombre de

Hartmann réduit le transfert thermique et supprime les cellules de recirculation. En outre, il a constaté que l'ajout de nanoparticules augmente le nombre de Nusselt aux faibles valeurs du nombre de Rayleigh.

Polidori et al. [19] ont montré que le transfert de chaleur par convection naturelle est sensiblement affecté par les propriétés thermo-physiques du nanofluide, en particulier par sa viscosité et sa conductivité thermique. Cependant, la plupart des travaux numériques mentionnés précédemment s'appuient sur des modèles théoriques. Ces derniers ne prédisent pas la contribution correcte des nanoparticules en termes d'amélioration du transfert thermique. Par conséquent, nous avons utilisé, dans la présente étude, les relations empiriques proposées par **He et al** [20].

Arol et al [21] ont étudié l'effet de l'angle d'inclination de la cavité carrée remplie de différents fluides ; la cavité est divisée par un solide imperméable, les équations qui représentent la convection naturelle sont discrétisées par la méthode des différences finies.

Lamsaadi et al [22] ont étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité rectangulaire horizontale remplie d'un fluide non-Newtonien et soumise à un flux de chaleur uniforme ascendant, les équations gouvernantes sont résolues numériquement en utilisant la méthode des différences finies avec un maillage régulier.

Velusamy et al [23] ont quant à eux étudié numériquement l'influence de l'émissivité de parois, de l'écart de température et de la température moyenne sur les transferts de chaleur convectif et radiatif dans une cavité carrée différentiellement chauffée remplie d'air considéré comme un milieu transparent. Pour la configuration étudiée par les auteurs ($\Delta T = 50K$), l'approximation de Boussinesq n'est plus valable

1.8.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions fondamentales sur le transfert de la chaleur, ainsi qu'une revue bibliographique des études antérieures numériques et expérimentales qui ont traité le problème choisi.

Chapitre 02 :
Formulation
mathématiques

2.1.INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons dans un premier temps les équations, modélisant la convection naturelle, qui expriment les lois de conservation de masse (de continuité), de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et d'énergie. Beaucoup d'ouvrages de la mécanique des fluides et de transfert thermique ont bien décrit les développements mathématiques nécessaires à l'obtention de ces équations. Dans un deuxième temps, on applique ces équations au cas d'une cavité rectangulaire.

2.2.Description du problème

La figure 2.1 présente le problème considéré dans une cavité rectangulaire. La paroi horizontale inférieure et la paroi verticale droite sont chauffées à une température T_C . La paroi verticale gauche et la paroi supérieure sont à la température $T_F < T_C$, l'espace restant des parois formant la cavité est supposé adiabatique et le rapport d'aspect de la cavité $A = L/H = 1,5$. On utilise le nanofluide avec trois différents types de nanoparticules (Cu, TiO_2 et Al_2O_3). La fraction volumique des nanoparticules est prise dans l'intervalle $0,01 \leq \phi \leq 0,04$. Le nombre de Grashof compris entre 10^3 et 10^5 .

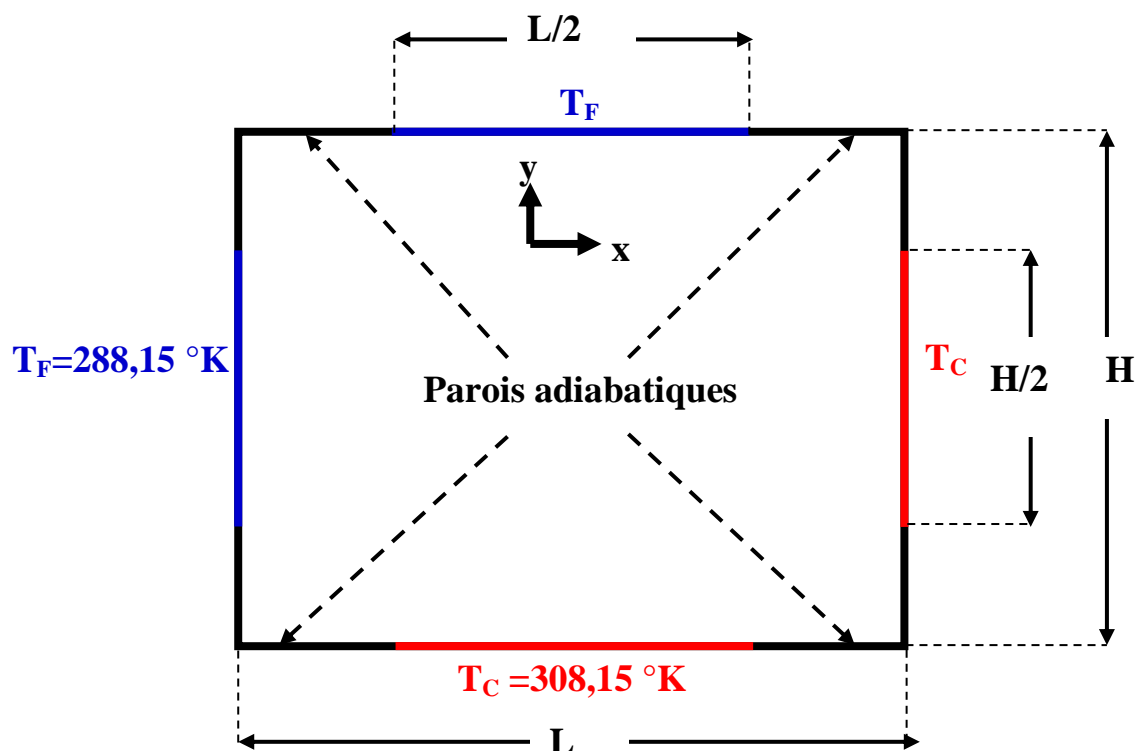


Figure 2.1: Représentation schématique du problème

Les propriétés thermo-physiques des nanofluides sont déterminées par les corrélations de **Khanafar et al.** [24]. Les propriétés physiques du fluide pur (eau) et celles des nanoparticules (Cu, Al₂O₃ et TiO₂) sont données dans le Tableau 1 à la température T = 25°C.

	Cp (J / kg.K)	ρ (kg / m ³)	λ (W / mK)	α (m ² / s)10 ⁻⁷	β (1/ K)10 ⁻⁵
Eau	4179	997.1	0.613	1.47	21
Cu	385	8933	400	1163.1	1.67
Al ₂ O ₃	765	3970	40	131.7	0.85
TiO ₂	686.2	4250	8.9538	30.7	0.9

Tableau 2.1: Propriétés thermo-physiques du fluide pur et des nanoparticules

2.3. HYPOTHESE SIMPLIFICATRICES

Les hypothèses considérées dans ce problème sont :

- Le transfert de masse est négligeable.
- La dissipation visqueuse est négligeable.
- Il n'y a aucune de chaleur interne.
- Le fluide est Newtonien, incompressible et obéissant à l'approximation de Boussinesq, cette approximation consiste à considérer que la masse volumique du fluide ne varie que dans le terme des forces de volume (dilatation), ce qui donne naissance au phénomène de la convection thermique.

2.4. APPROXIMATION DE BOUSSINESQ-OBERBECK

L'approximation de Boussinesq et Oberbeck suggère que les changements de densité dans le fluide peuvent être négligés sauf dans le terme de gravité où ρ est multiplié par g. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont supposées constantes et calculées à la température de référence T_0 , à l'exception de la masse volumique ρ dans ce terme. L'équation d'état pour la masse volumique ρ en utilisant le développement de Taylor devient:

$$\rho_{nf} = \rho_0 \left[1 - \frac{T - T_0}{T} \right] \quad (2.1)$$

En se limitant à un développement du premier ordre, on obtient :

$$\rho_{nf} = \rho_0 \left[1 - \beta_{nf} (T - T_0) \right] \quad (2.2)$$

Le coefficient de dilatation isobare du fluide, soit :

$$\beta_{nf} = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_p \quad (2.3)$$

Cette approximation de Boussinesq- Oberbeck est appliquée si le nombre de Mach de l'écoulement est petit.

2.5. LES EQUATIONS GOUVERNANTES

Pour étudier le phénomène physique, on doit le convertir en équations mathématiques pour mieux le comprendre. Les simulations numériques ont été utilisées comme moyen alternatif de la réalité, sachant que le modèle mathématique ou numérique est illustré par un algorithme

2.5.1. Équation de continuité

L'équation de conservation de la masse, aussi communément appelée équation de continuité s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

2.5.2. Équation de quantité de mouvement

Les équations de Navier Stokes pour un fluide newtonien incompressible et stationnaire et pour le cas d'une convection mixte en 2D s'écrivent comme suite :

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe (x) :

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho_{nf} \cdot \beta_{nf} (T - T_0) \quad (2.5a)$$

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe (y) :

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_{nf} \cdot \beta_{nf} \cdot g (T - T_0) \quad (2.5b)$$

2.5.3. Équation d'énergie

L'équation de la conservation d'énergie s'écrit comme suit :

$$u \frac{dT}{dx} + v \frac{dT}{dy} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.6)$$

2.6. CONDITIONS AUX LIMITES

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sur la paroi chaude :} \\ \text{pour } (y = 0; 0 \leq x \leq 1) \Rightarrow \frac{H}{4} \leq L \leq \frac{3H}{4} \\ \text{pour } (x = 1; 0 \leq y \leq 1) \Rightarrow \frac{H}{4} \leq L \leq \frac{3H}{4} \end{array} \right\} u = v = 0; T_C = 308,15K \quad (2.7a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sur la paroi froide :} \\ \text{pour } (x = 0; 0 \leq y \leq 1) \Rightarrow \frac{H}{4} \leq L \leq \frac{3H}{4} \\ \text{pour } (y = 1; 0 \leq x \leq 1) \Rightarrow \frac{H}{4} \leq L \leq \frac{3H}{4} \end{array} \right\} u = v = 0; T_F = 288,15K \quad (2.7b)$$

$$\text{Pour les autres parois sont adiabatiques : } u = v = 0; Q = 0 \text{ W/m}^2 \quad (2.7c)$$

2.7. NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

Pour déterminer les caractéristiques de transfert de chaleur à l'état stationnaire, dans la présente étude, le nombre de Nusselt est défini comme suit:

- Sur la paroi chaude horizontale inférieure

$$\text{Nu}_x = - \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \right) \frac{H}{T_C - T_F} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.8a)$$

- Sur la paroi chaude verticale droite

$$\text{Nu}_y = - \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \right) \frac{H}{T_C - T_F} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8b)$$

2.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, sont présentées les équations gouvernant la convection naturelle et les conditions aux limites appliquées aux différentes parois de la cavité ; ces équations et ces conditions aux limites sont prises sous leur forme dimensionnelle et adimensionnelle. Les différents nombres adimensionnels apparaissent dans les équations gouvernantes.

Chapitre 03 :
Méthodes numériques

3.2.INTRODUCTION

Les problèmes physiques rencontrés dans notre quotidien (les problèmes de convection, les écoulements dans les conduites, etc.) sont décrits par des équations à dérivées partielles fortement couplées et non linéaires. En général, Ces équations n'admettent pas de solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. C'est pourquoi un recours aux méthodes de résolution numériques s'avère nécessaire. Il existe plusieurs méthodes numériques[25] :

- Méthode des différences finies ;
- Méthode des volumes finis ;
- Méthode des éléments finis ;

Chaque méthode de résolution numérique d'un problème continu comporte une phase de maillage et une phase de discrétisation. La phase de maillage consiste à diviser le domaine d'étude en de petits volumes appelés volumes de contrôle. La phase de discrétisation transforme le problème continu en un problème discret. Les équations ainsi que les conditions aux limites sont approchées par des équations et conditions discrètes.

3.2.1. Méthodes des différences finies [25]

La méthode des différences finies consiste à approximer les dérivées des équations différentielles au moyen des développements de Taylor. Les fonctions dérivées sont approchées par plusieurs types de schémas aux différences fines (différences finies en avant, en arrière et centrées). La précision des résultats varie d'un schéma à un autre selon la troncature utilisée. Concernant les avantages de cette méthode, on peut dire qu'elle est d'une grande simplicité d'écriture et de faible coût de calcul. D'autre part, les inconvénients indiquent que le principe de conservation n'est pas assuré après la discrétisation.

3.2.2. Méthodes des volumes finis

La méthode des volumes finis a été développée par **Patankar [26]**. Elle est utilisée pour résoudre numériquement les équations de conservation sous forme intégrale. Celle-ci s'appuie sur une discrétisation du domaine de calcul en plusieurs volumes. Chacun d'entre eux est entouré d'un ensemble d'éléments de volume qui recouvrent le domaine sur lequel on transforme directement les équations aux dérivées partielles (E.D.P) en équations algébriques faciles à résoudre. La méthode est basée sur les principes généraux suivants :

- Discrétisation spatiale des nœuds ou les différentes variables sont définis (vitesses, pressions, températures, etc.);
- Discrétisation spatiale des éléments de volumes ou associés aux nœuds;

- Discrétisation des équations en intégrant les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sur chaque élément de volume du domaine en approximant les différents termes des équations.
- Application du principe de conservation à chaque élément de volume pour écrire le bilan de chaque variable sur chaque élément de volume.
- Il existe différentes méthodes de résolution selon la forme des éléments et les fonctions utilisées pour approximer les différents termes du bilan dans ce chapitre, on étudiera les méthodes aux volumes finis sur des maillages structurés non uniformes sur une géométrie de forme conique annulaire

3.2.3. Méthodes des éléments finis [25]

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est généralement appelée découpage ou discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul.

3.3. MAILLAGES

Il existe plusieurs types de maillages, définis par chaque élément qui est associé à un certain nombre de type de nœuds qui servent la liaison.

- Élément 2D de type triangle
- Élément 2D de type "quadrilatère"
- Élément 3D de type "hexagone"

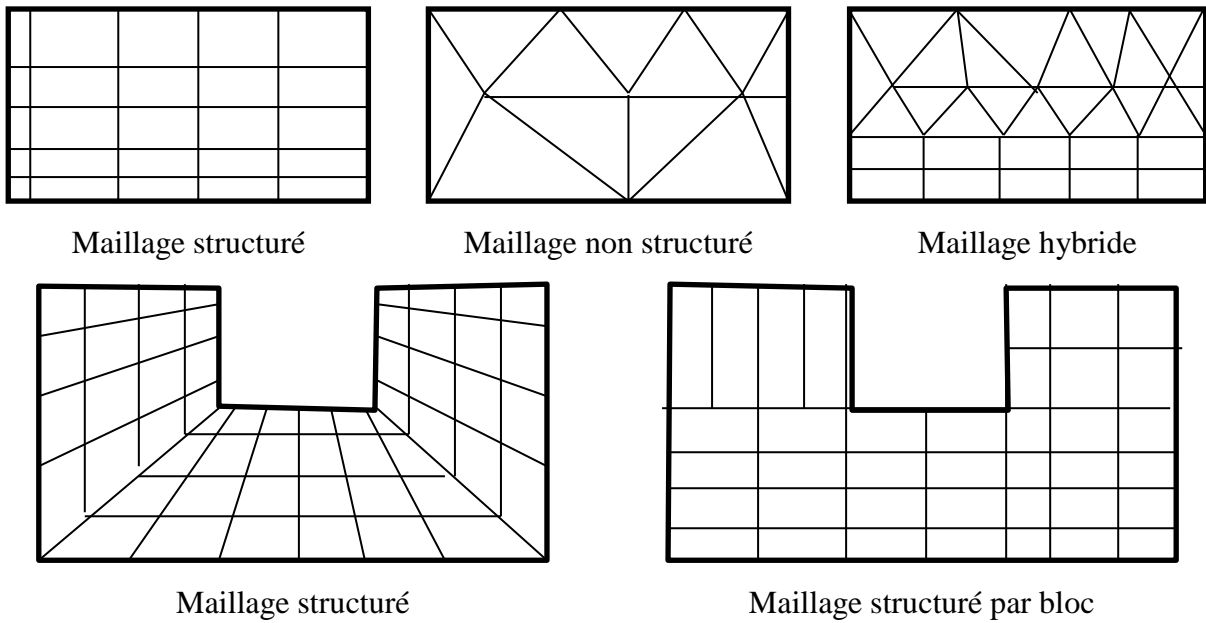


Figure 3.1 : Types de maillage utilisé par "FLUENT"

3.1.1. Le domaine de calcul :

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle, comme indiqué dans (la figure 3.2). Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal (O), les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le volume de contrôle entourant (O) est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y.

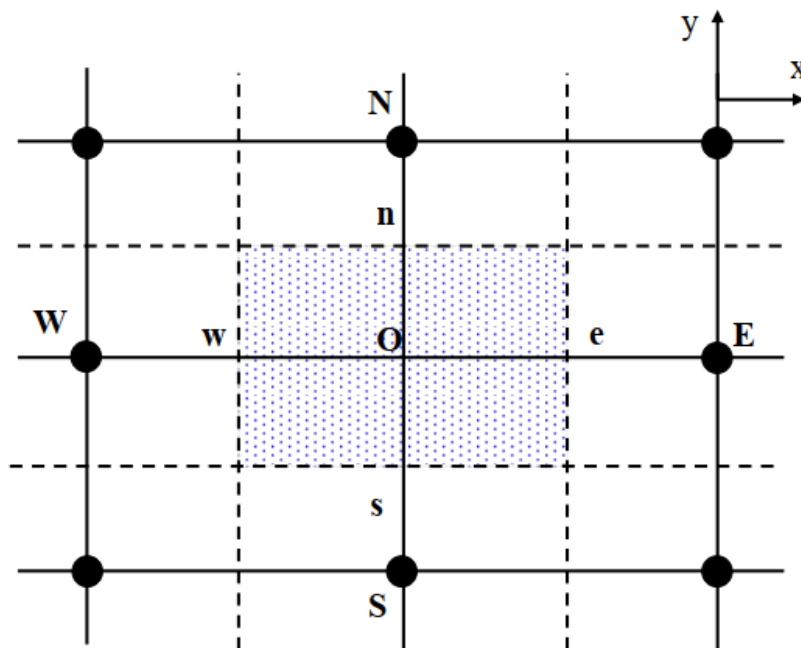


Figure 3.2: Domaine de calcul.

Dans cette étude, on a utilisé la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple, sa fiabilité quand aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques.[27]

3.4. STRUCTURE DU CODE FLUENT

Le code de calcul Fluent est utilisé pour les simulations des géométries simples et les plus complexes. Ce code intègre trois modules importants, la figure ci-dessous représente la structure de base du code FLUENT[27].

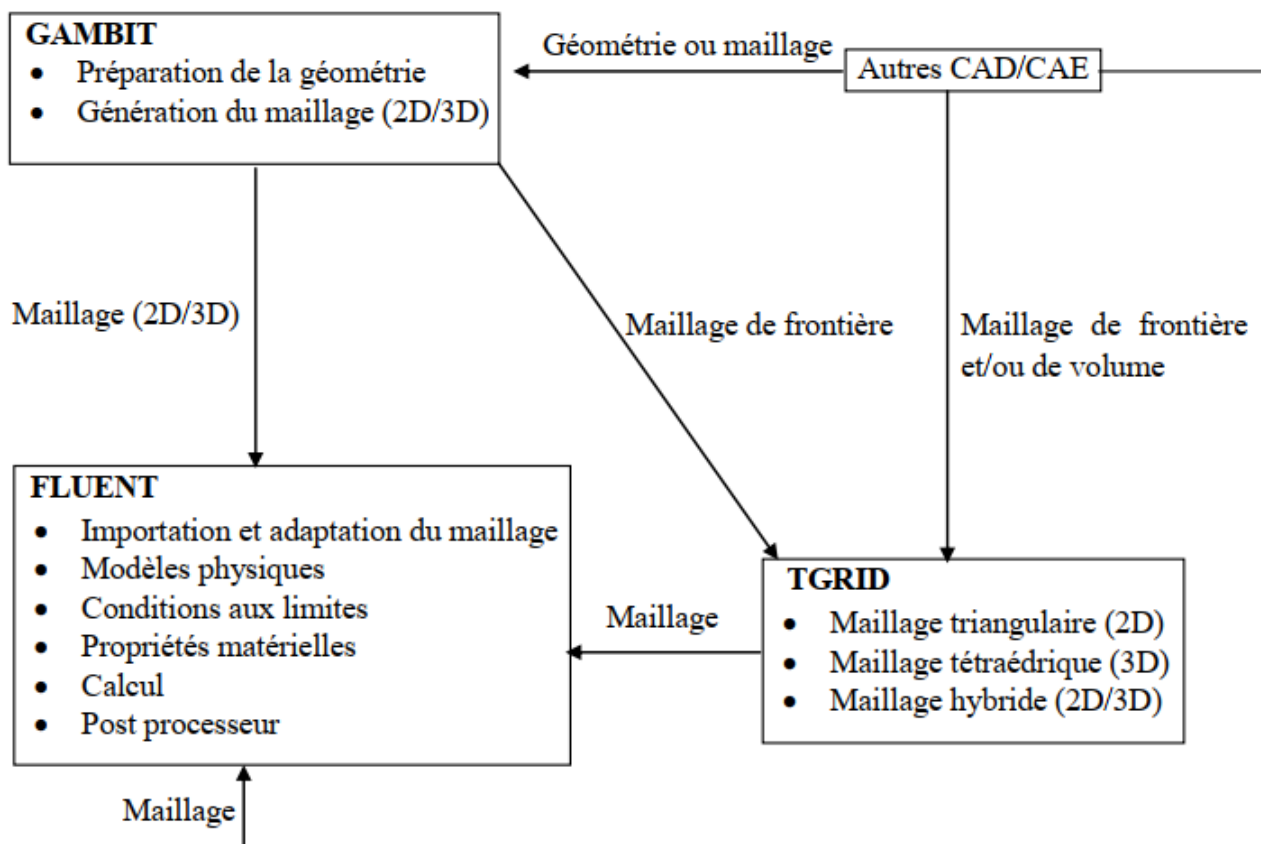


Figure 3.3: Structure de base du code FLUENT.

3.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, sont présentées les différentes méthodes numériques, les types de maillage et la structure de Fluent.

Chapitre 04 :
Résultats et discussions

4.1.INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré principalement à la présentation et la discussion des résultats numériques de la convection naturelle en régime laminaire dans une cavité rectangulaire bidimensionnelle avec des nanofluides. La simulation numérique, est réalisée à l'aide du code de calcul Fluent. La construction des géométries et leurs maillages sont faits à l'aide du logiciel Gambit. Les principaux résultats obtenus reflètent le comportement un champ dynamique et thermique dans la cavité, sont exposés dans ce chapitre

4.2.MAILLAGE DU DOMAIN

Les résultats sont donnés sous forme de lignes de courant, de lignes isothermes, et de variation du nombre de Nusselt de paroi chaude. Le maillage est uniforme (67X80) pour les deux directions y et x, il donne des valeurs plus précises par rapport aux autres maillages. Les résultats obtenus pour nanofluide eau+Cu, $Gr = 10^4$, $\phi = 0,03$ et $A=1,5$, avec ce maillage (67X80) sont comparables à ceux obtenus pour le maillage de (47X60) et (57X70). La finesse du maillage (47X60) génère des variations maximales inférieures à 0,19 % en termes de Nu_{moy} (tableau 4.1), on voit clairement qu'il existe une petite différence entre les résultats des trois maillages. Cette finesse est utilisée dans tous les calculs ultérieurs

Maillage	(47X60)	(57X70)	(67X80)	Erreur % (abs)		
				(47X60)	(57X70)	(67X80)
Nu_{moy}	5.643251	5.650933	5.654005	0,19	0,054	-

Tableau 4.1 : Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ Cu, $Gr = 10^4$, $\phi = 0.03$, $A=1,5$ et pour paroi inférieur chaude

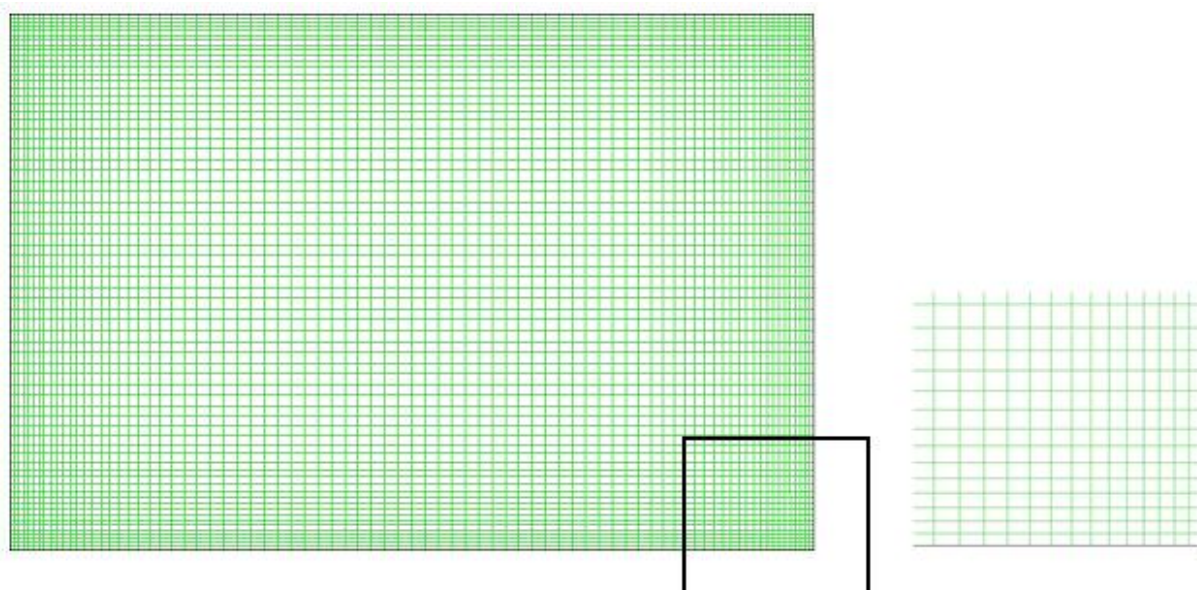


Figure 4.1: Le maillage 67X80 utilisé dans cette simulation

4.3.VALIDATION NUMERIQUE

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du code commercial ANSYS Fluent version 6.3.26. Pour la validation numérique du code de calcul, on procède à la comparaison des résultats numériques de la présente étude avec ceux obtenus par Oztop et al. [14]. La figure 4.3 présente la variation du nombre de Nusselt local obtenu au niveau de la paroi chaude pour le nanofluid Cu-eau et pour une fraction volumique des nanoparticules $\phi = 0,1$. On remarque une bonne concordance entre les résultats numériques obtenus et ceux de [14].

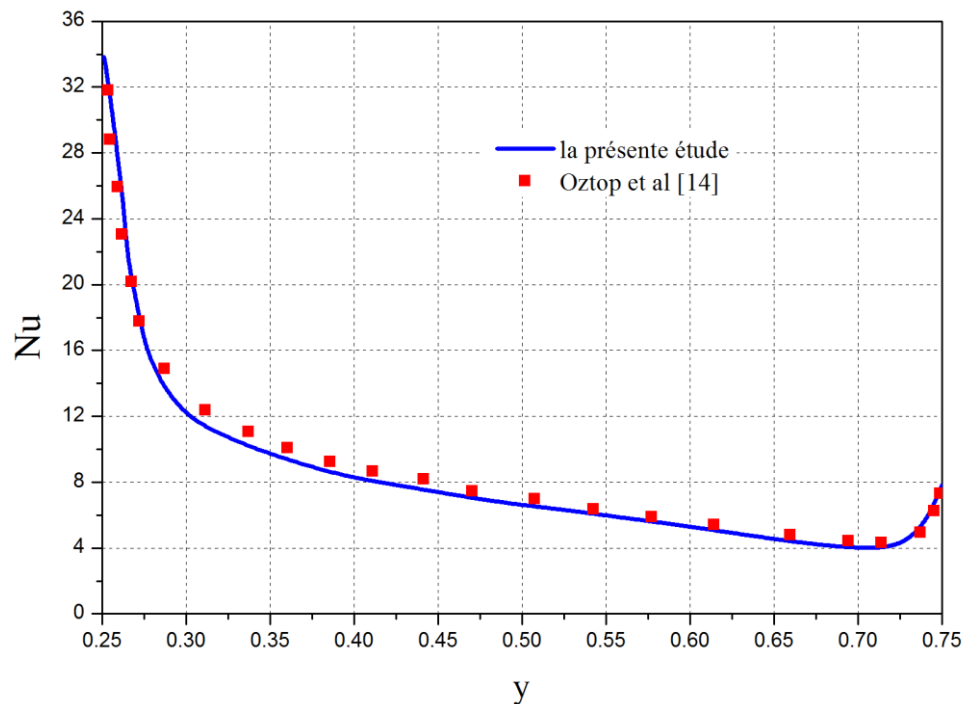


Figure 4.2: Validation thermique du code de nombre de Nusselt local;

4.4.RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de cette étude est de voir l'effet de la fraction volumique des nanofluides ϕ , du type de nanoparticules (Cu, Al_2O_3 et TiO_2), et du nombre de Grashof Gr sur l'amélioration de transfert de chaleur convectif.

4.4.1. Les lignes de courant et les lignes isothermes

La figure 4.3 montre les lignes de courant et les lignes isothermes dans le cas du nanofluid eau + Cu (ligne discontinue) et le fluide pur (ligne continue), pour un nombre de Grashof $Gr = 10^5$ et une fraction volumique pour de nanofluid $\phi = 0,04$. On remarque que les lignes de courant pour les deux fluides ne sont pas confondues, ceci montre que l'effet des nanoparticules injectées dans le pur fluide est clair. Pour les lignes isothermes, on remarque que celles de l'eau + Cu sont presque confondues avec celles du fluide pur au niveau de la source de chaleur.

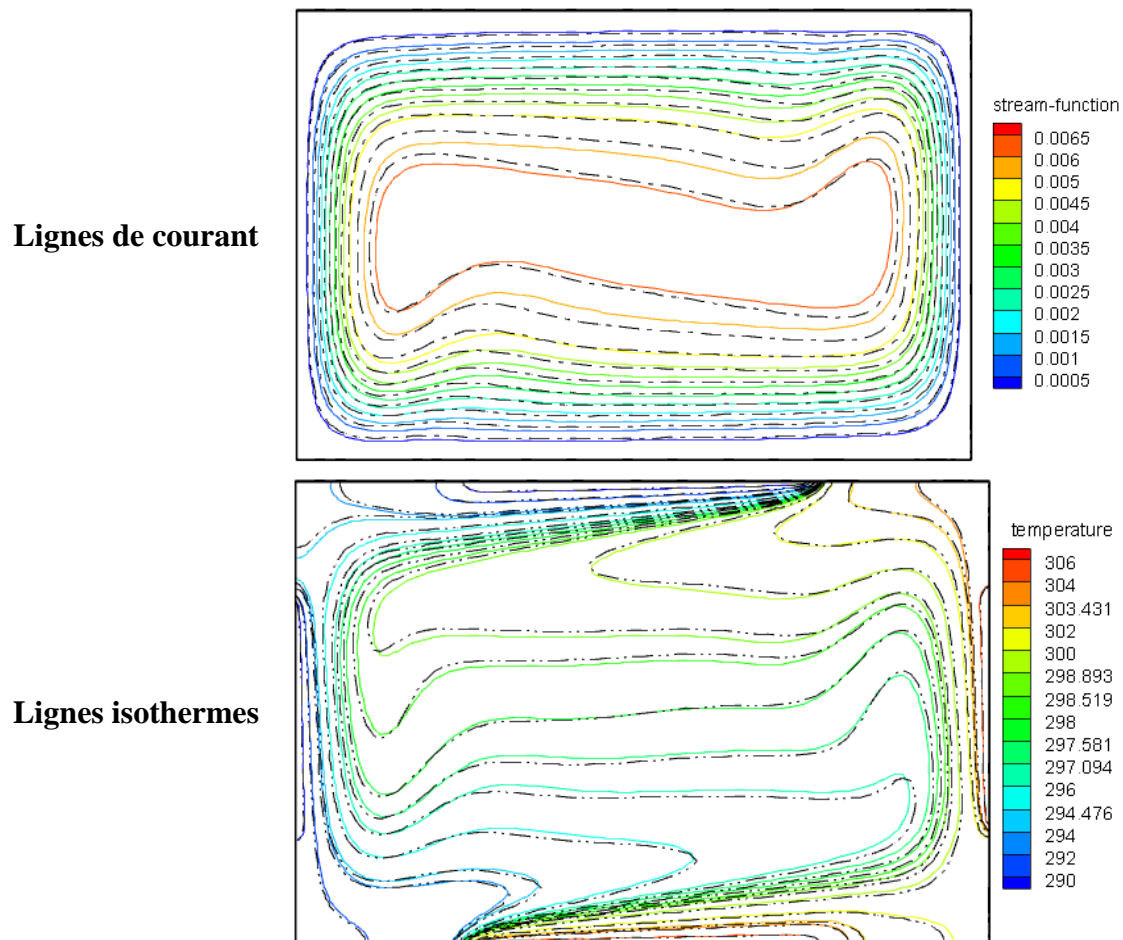
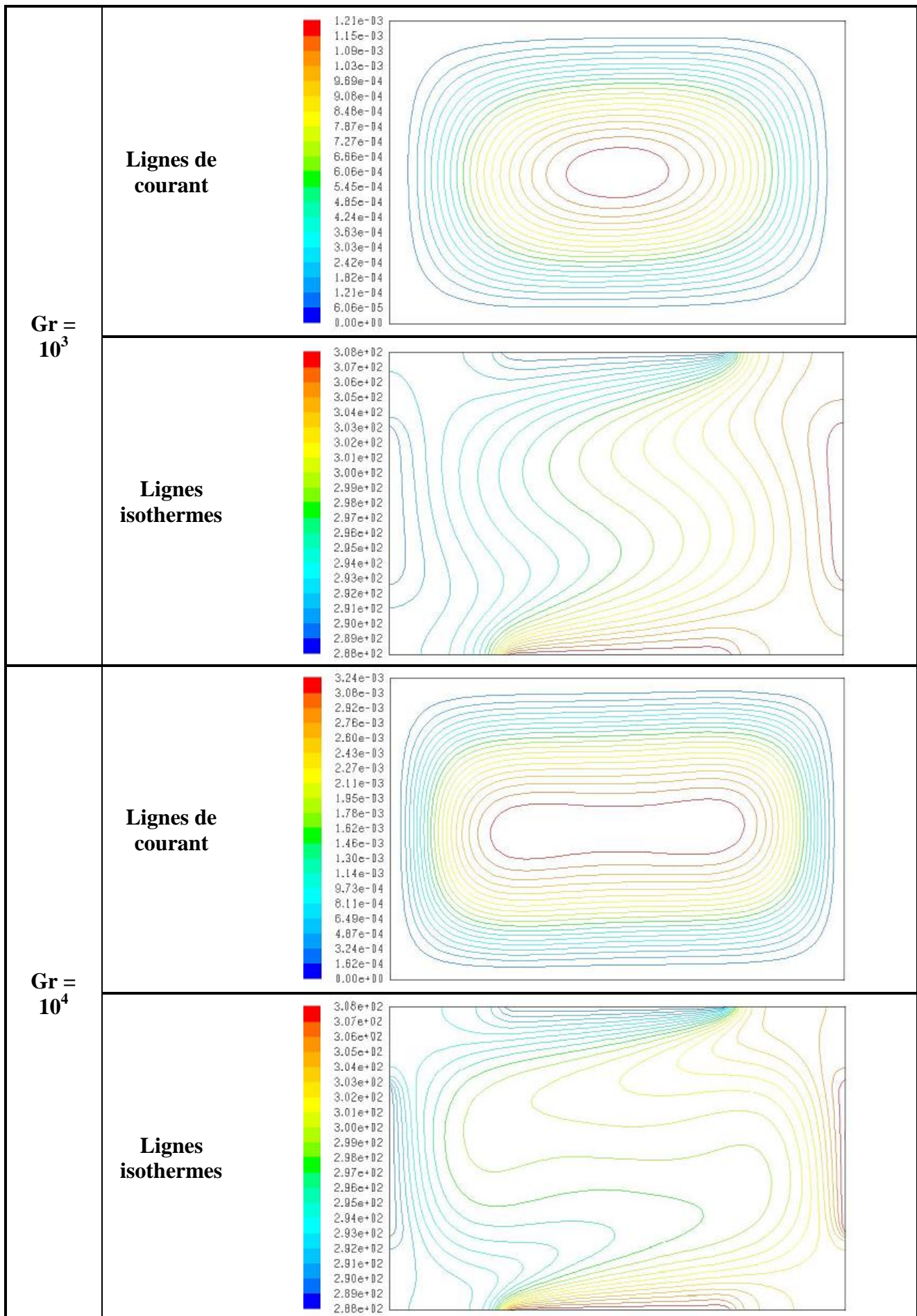


Figure 4.3: Lignes de courant et lignes isothermes pour nanofluid Cu + eau (—), eau pure (----) et pour $Gr = 10^5$, $\phi = 0,04$

Les figures 4.4, 4.5 et 4.6 représentent l'influence du nombre de Grashof sur la variation des lignes de courant et les lignes isothermes pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$ et pour les trois nanofluides (eau + Cu, eau+ TiO_2 et eau+ Al_2O_3).

On remarque que, l'allure des lignes de courant varie avec la variation du nombre de Grashof, où la valeur maximale est obtenue pour le nombre de Grashof $Gr = 10^5$. Les lignes isothermes, l'allure commencent à changer pour enfin celle qui correspond à $Gr = 10^4$ et $Gr = 10^5$.

Nous constatons que, la circulation de fluide et le transfert thermique augmentent lorsque le nombre de Grashof augmente.



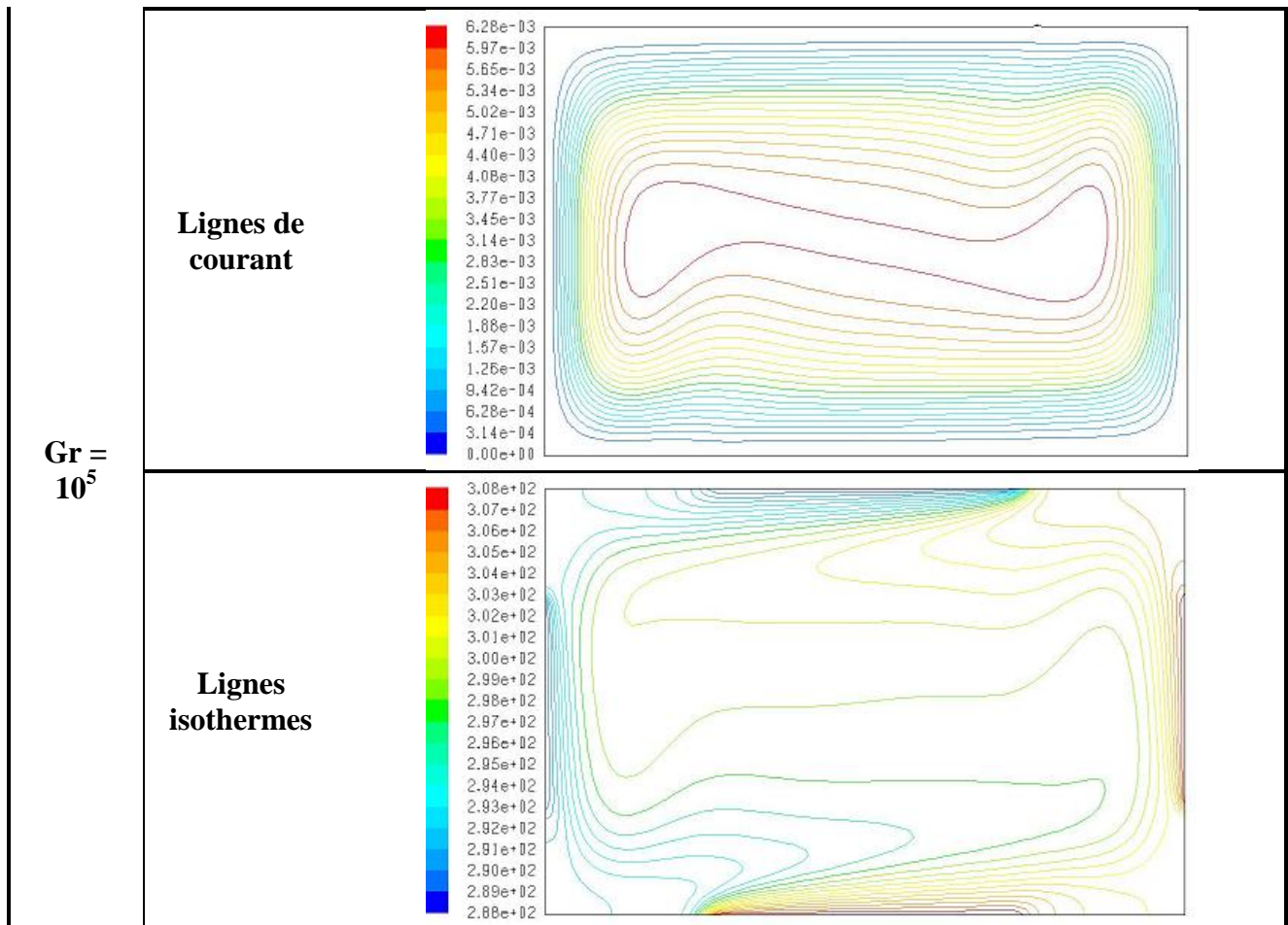
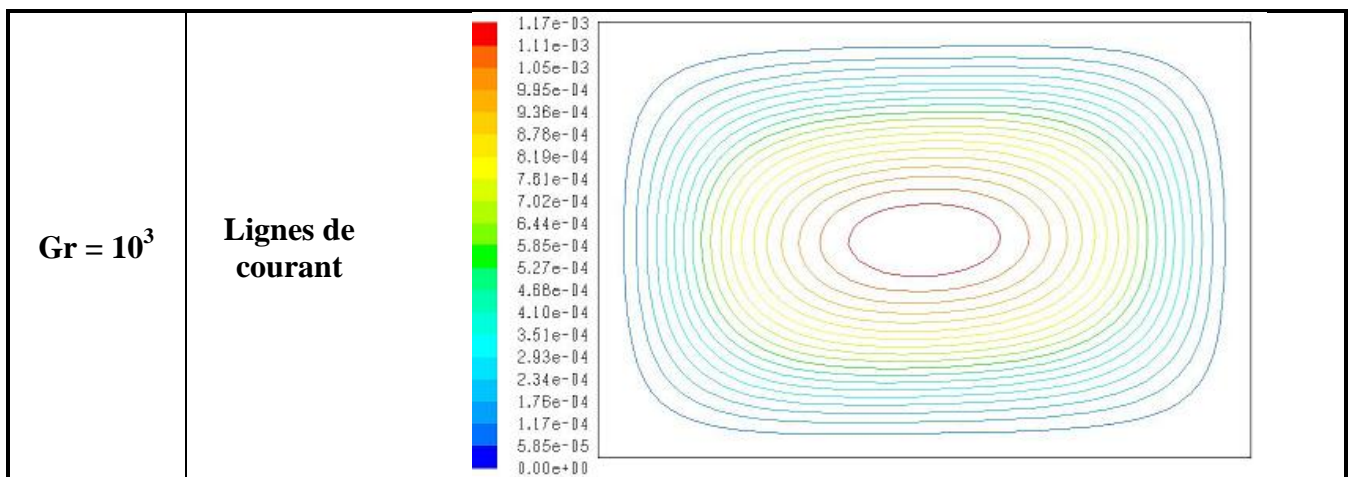
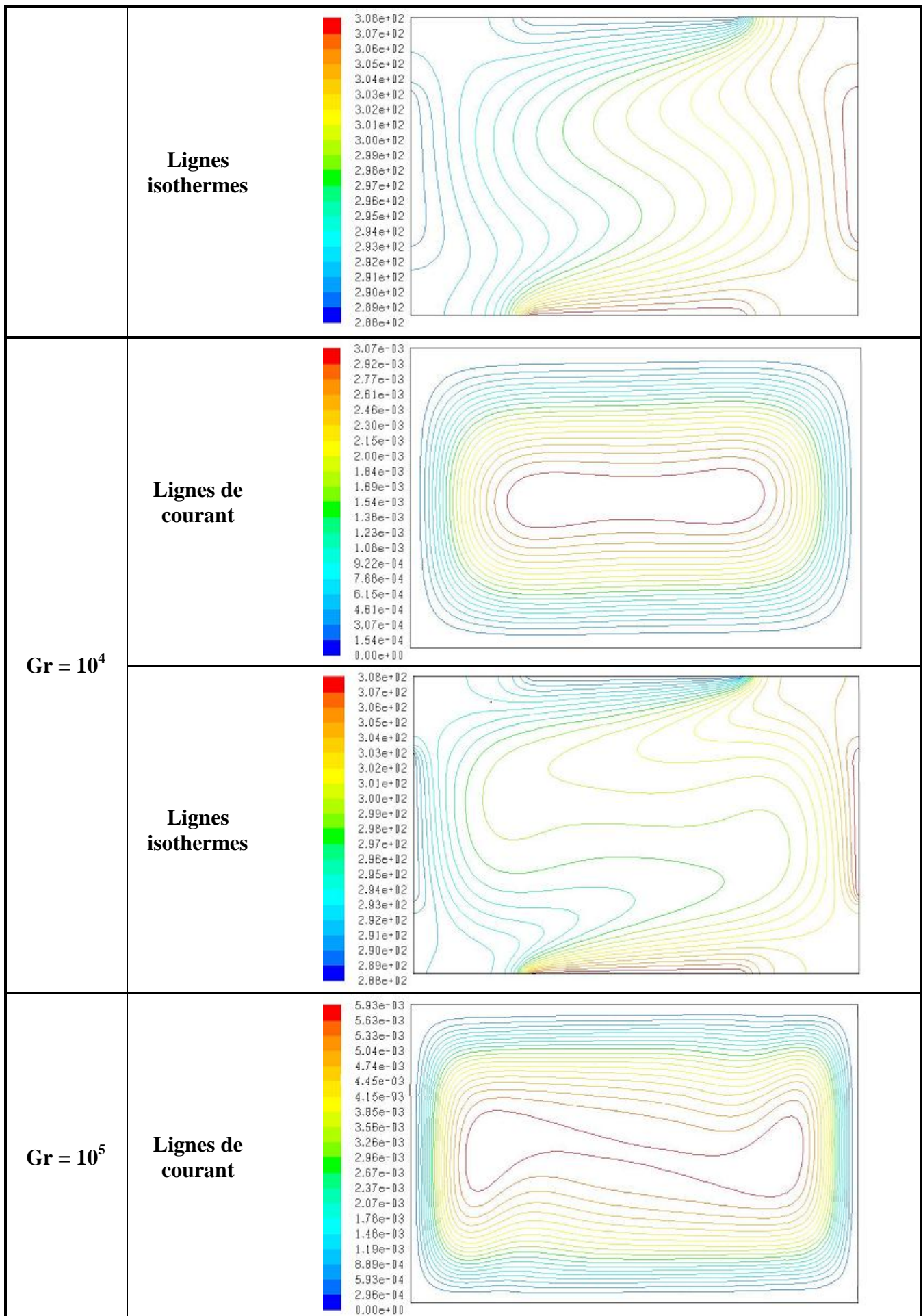


Figure 4.4 : Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Cu+ eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$





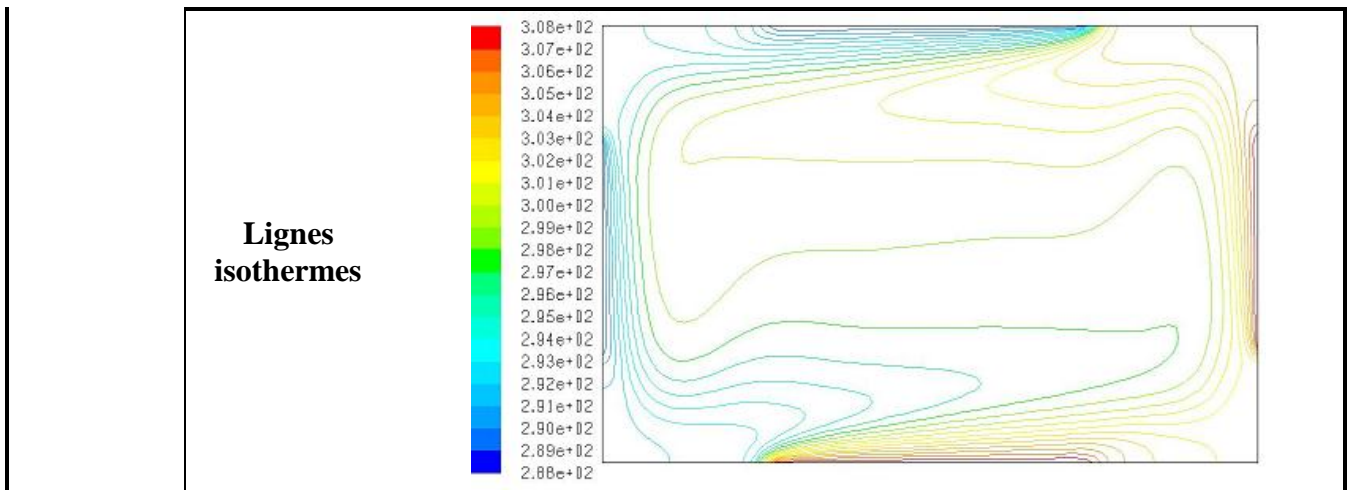
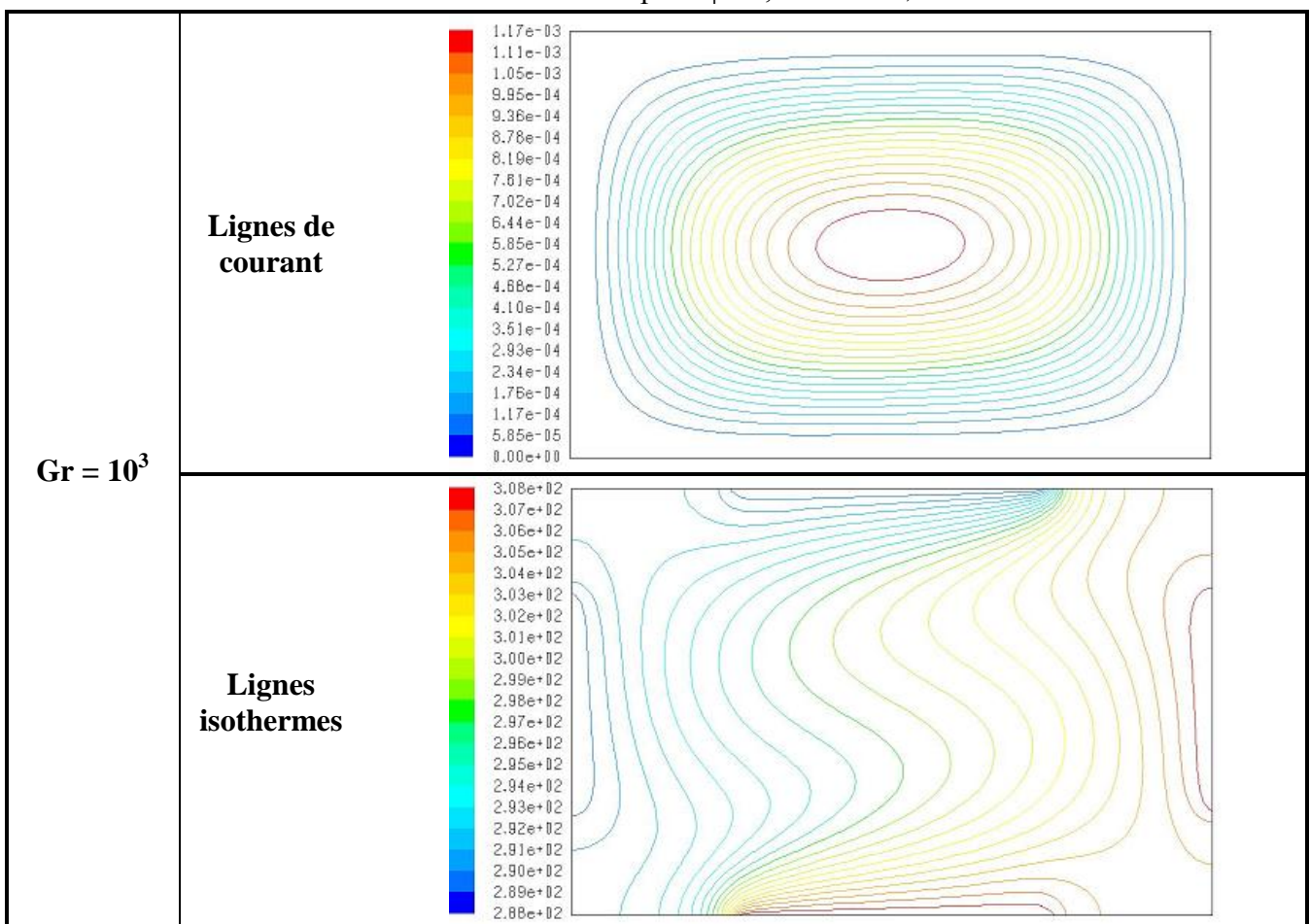


Figure 4.5 : Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de TiO_2 +eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi = 0,02$ et $A = 1,5$



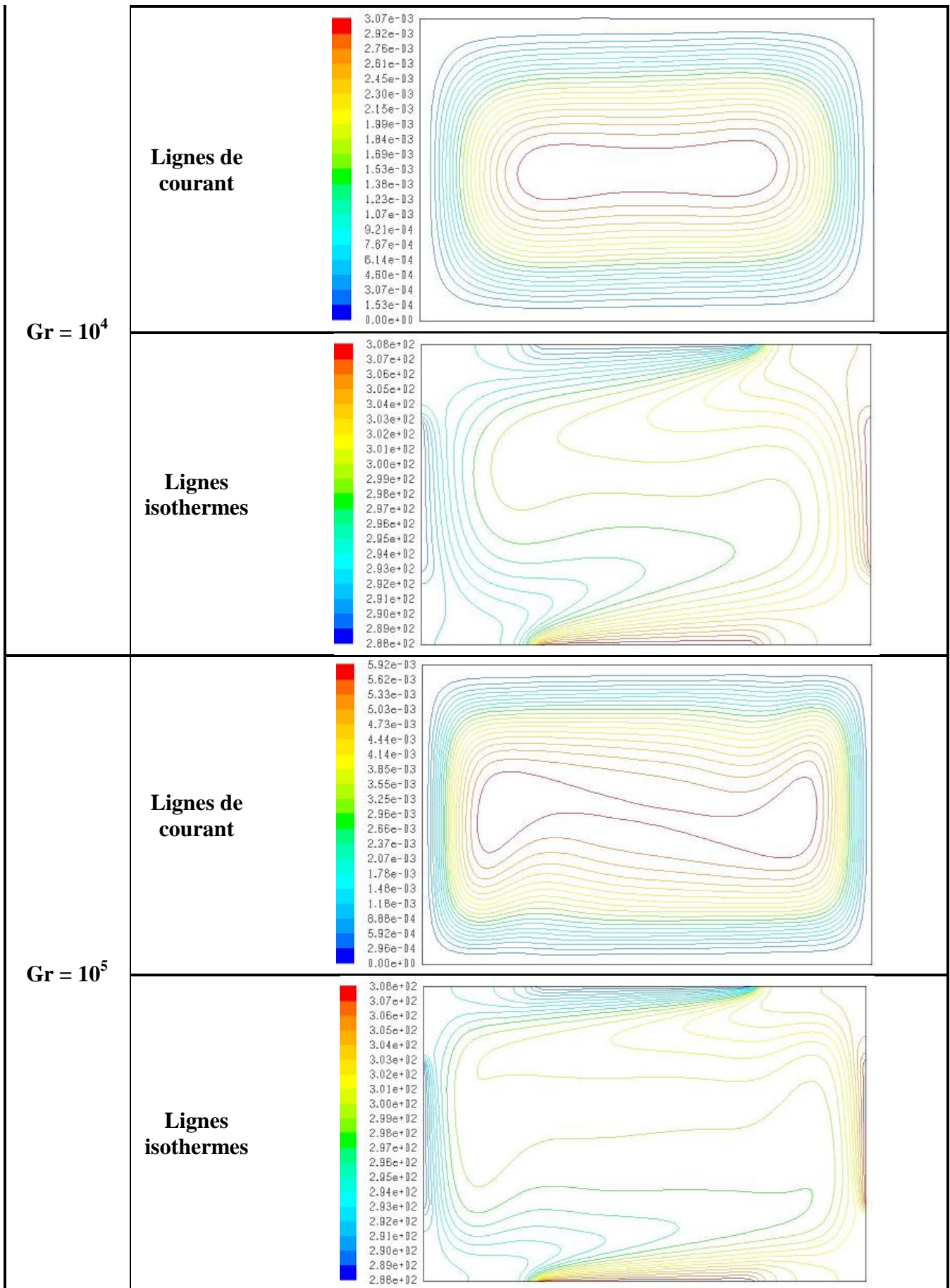
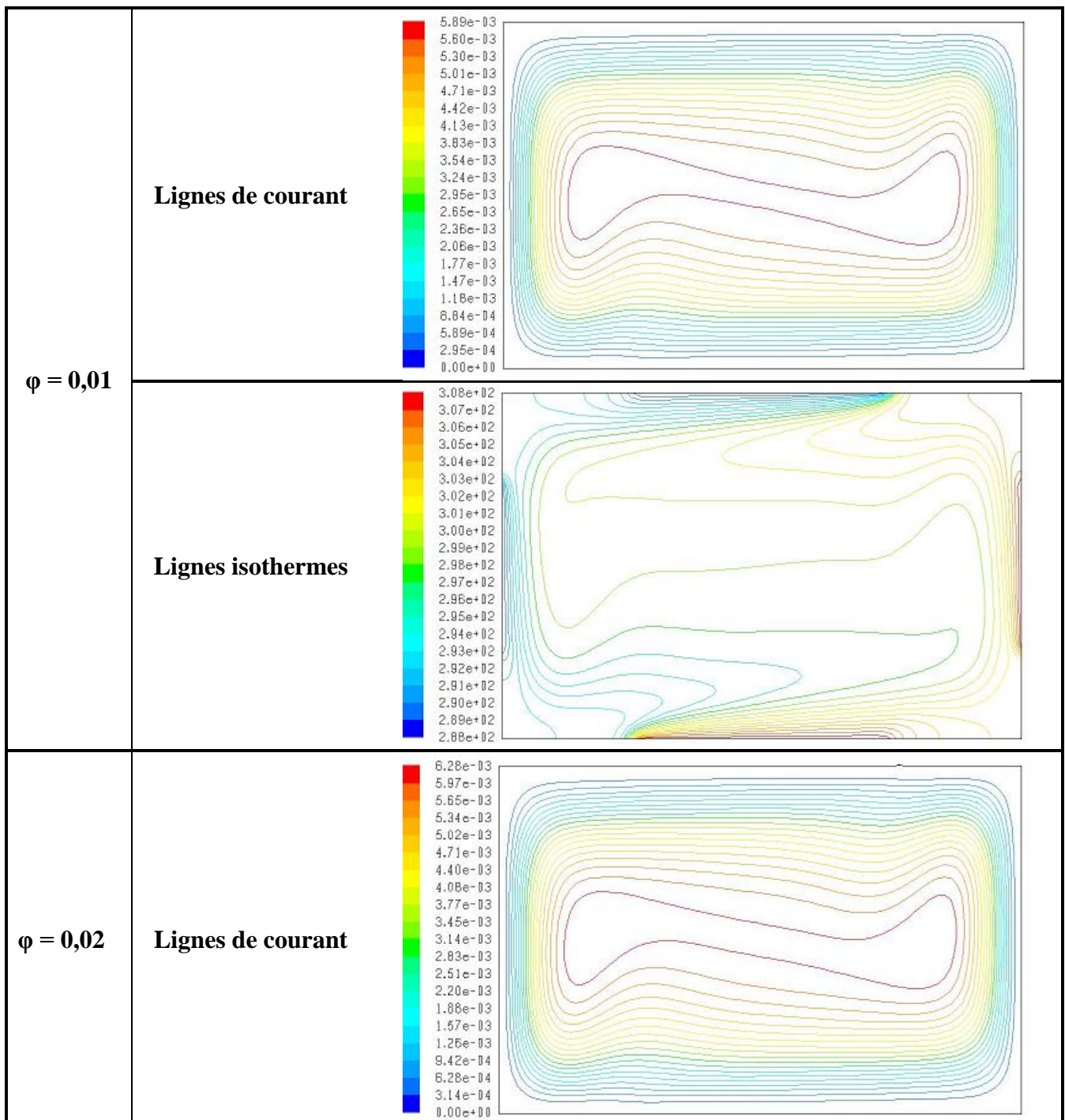
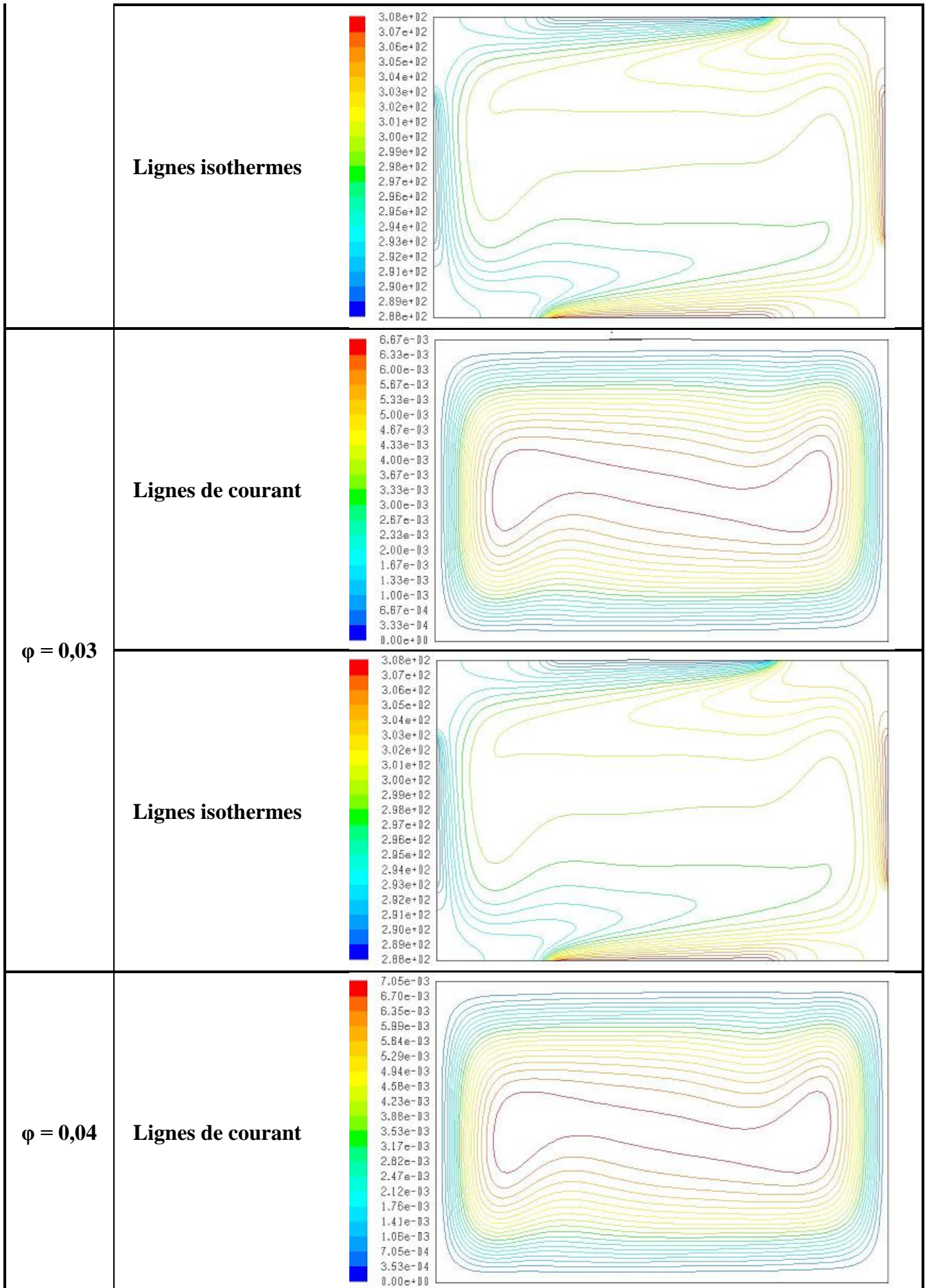


Figure 4.6 :Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Al_2O_3 +eau en fonction du nombre de Grashof pour $\phi =0,02$ et $A =1,5$

La figure 4.7 montre l'effet de la fraction volumique de nanoparticule ϕ sur les lignes de courant et la distribution de la température pour le nanofluide eau+ Cu, pour un nombre de Grashof $Gr=10^5$ et $A = 1,5$. La vitesse de circulation de la cellule augmente avec l'augmentation de fraction volumique ϕ . Les lignes de courant montrent que la vitesse de la cellule circulaire formée pour $\phi=0,04$ est plus grande que celle formée pour $\phi=0,01$.

Concernant les lignes isothermes, l'allure des lignes isothermes au milieu de la cavité sont similaires pour les quatre valeurs de la fraction volumique, par contre elles sont différentes au voisinage des parois de la cavité.





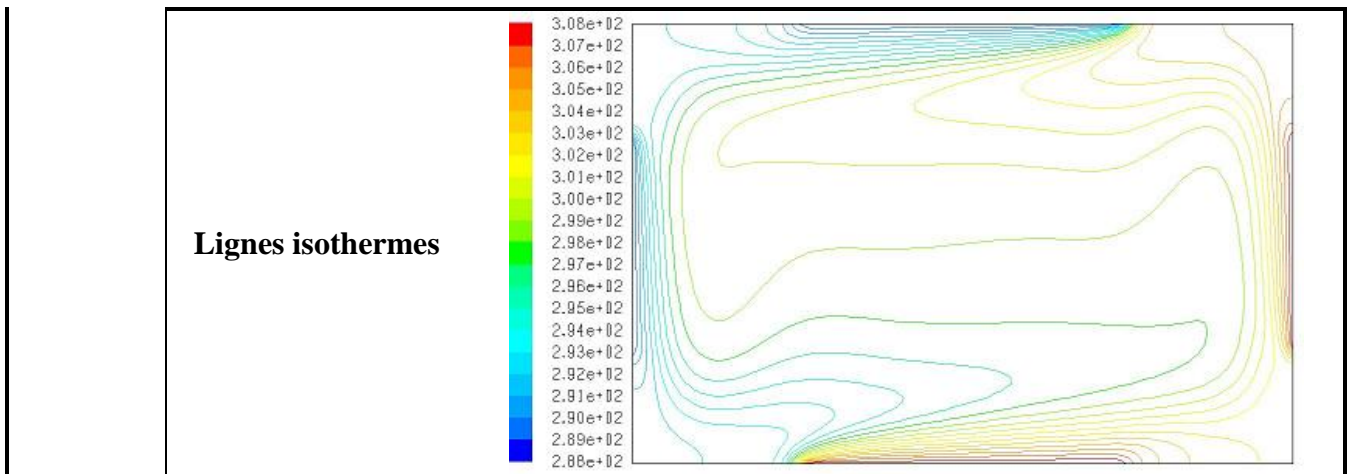
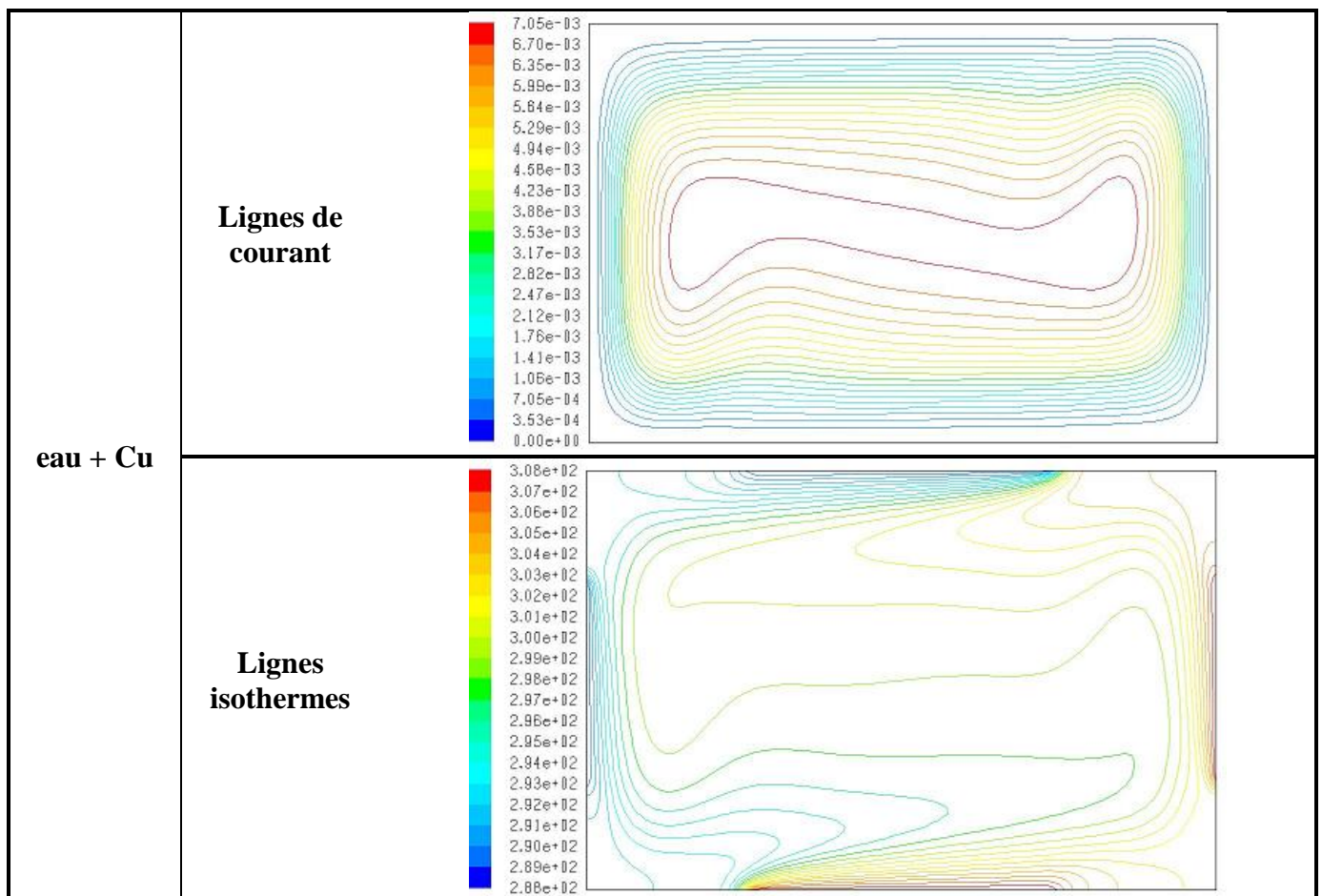


Figure 4.8 : Variation des lignes de courant et les lignes isothermes de Cu + eau en fonction de la fraction volumique de nanoparticule ϕ pour $Gr = 10^5$ et $A = 1,5$

La figure 4.9 montre l'effet des nanofluides sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour la fraction volumique de nanoparticule $\phi = 0,04$, $Gr = 10^5$ et $A = 1,5$. Nous remarquons que la vitesse de circulation de la cellule maximale est obtenue pour le nanofluide eau + Cu. Concernant les lignes isothermes, l'allure des lignes isothermes au milieu de la cavité sont similaires pour les trois cas.

D'après les lignes de courant on peut dire que, la nanoparticule Cu est donne un bon transfert thermique par rapport les nanoparticules Al_2O_3 et TiO_2 .



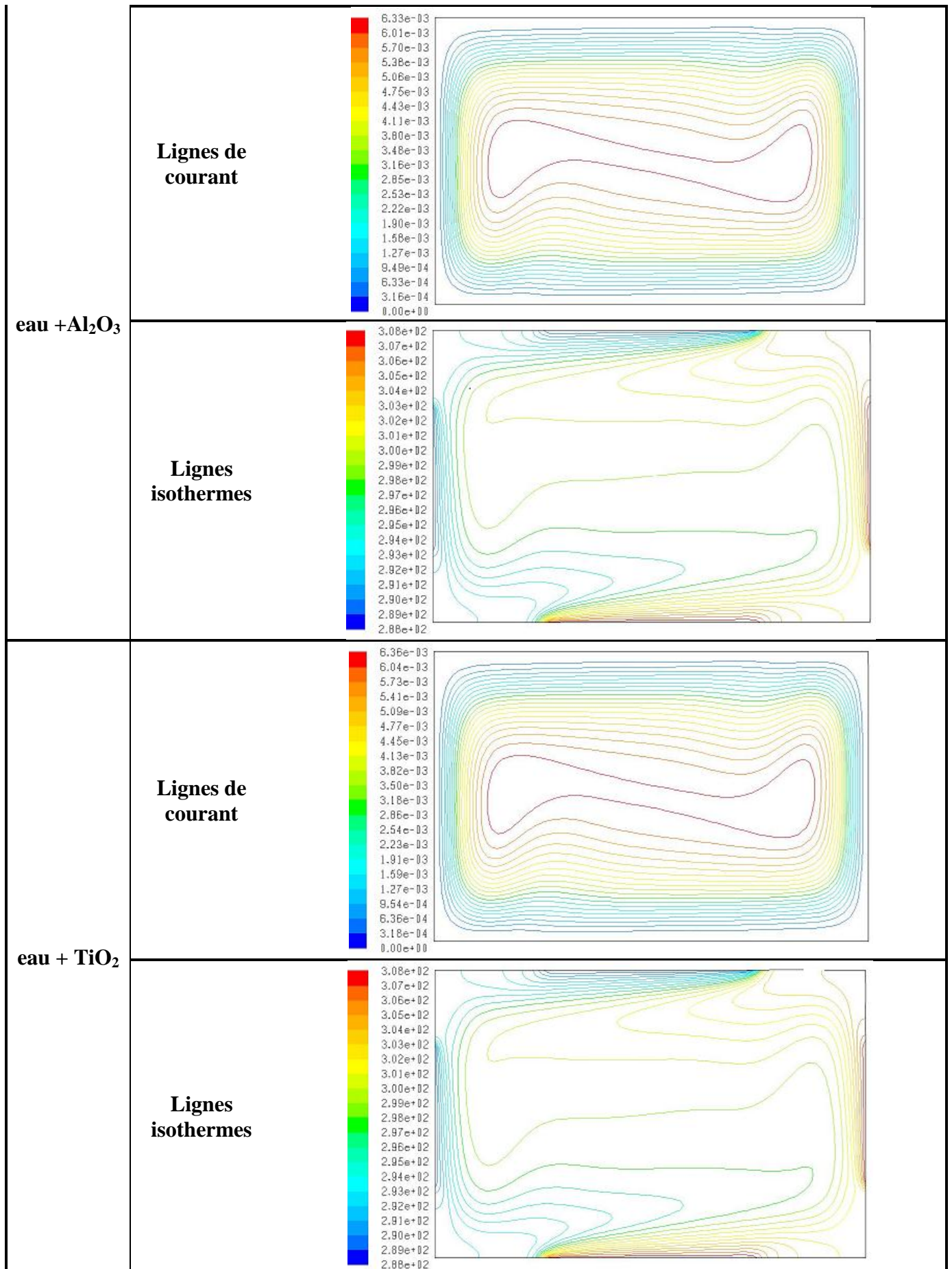


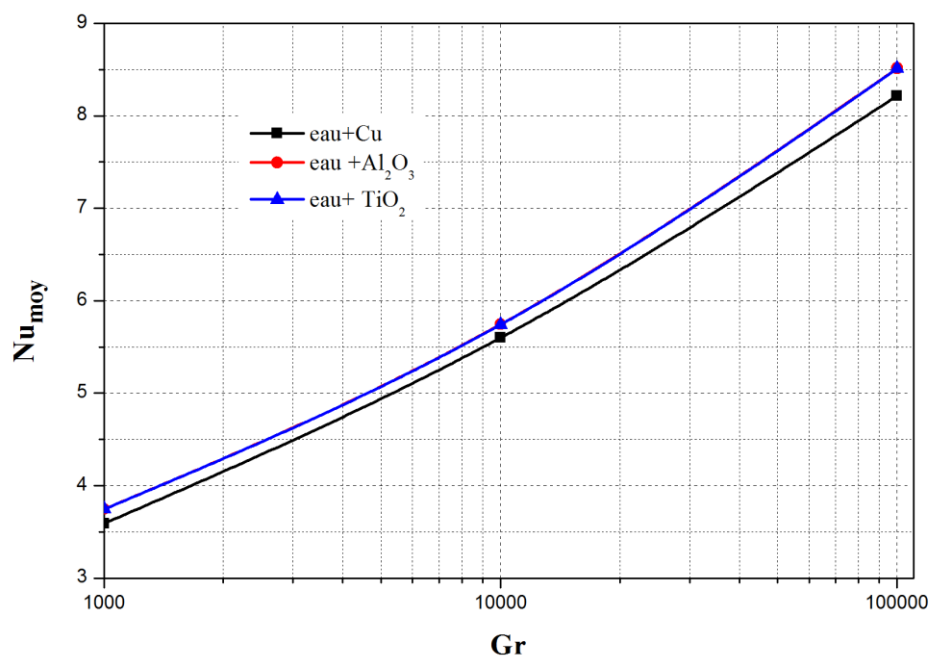
Figure 4.9 : variation des Lignes de courant et les lignes isothermes du nombre de Grashof $Gr = 10^5$ en fonction des différents nanofluides pour $\phi = 0,04$ et $A = 1,5$

4.4.2. Variation du nombre de Nusselt moyen

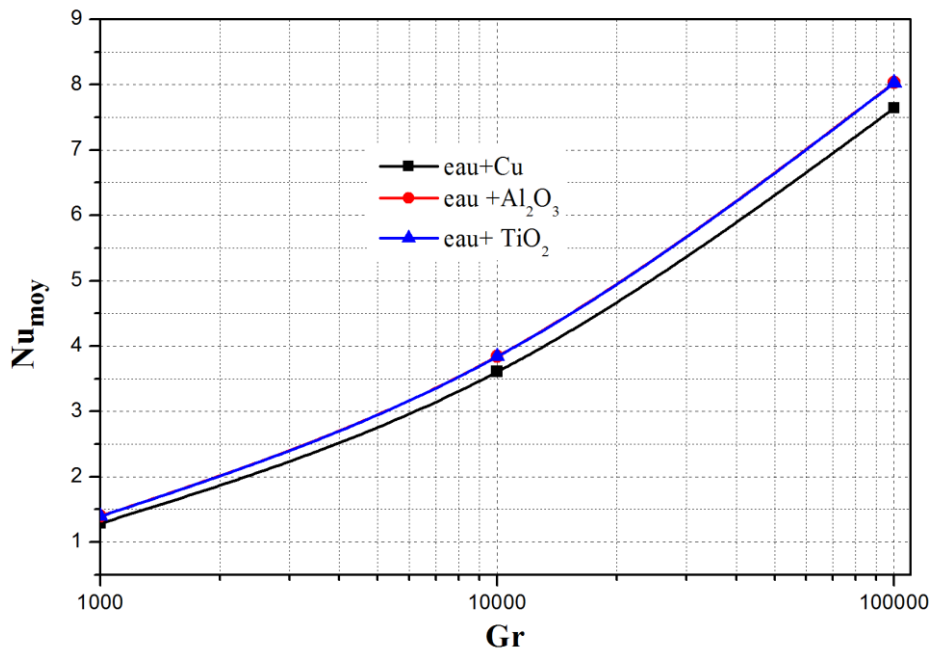
La figure 4.10 présente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Grashof pour les différentes nanoparticules (Cu, Al_2O_3 et TiO_2). Les résultats sont présentés pour le cas de $\phi=0,04$. On remarque que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Grashof. Les faibles valeurs du nombre de Nusselt moyen Nu_{moy} sont obtenus dans le cas du nanofluide Cu-eau et les plus grandes pour (Al_2O_3 , TiO_2). D'après les résultats obtenus par Oztop et al. [14] pour $\phi > 0,1$, le transfert thermique dépend de la conductivité thermique des nanoparticules. On peut donc conclure que le transfert thermique ne dépend pas de la conductivité thermique des nanoparticules pour les faibles valeurs de la fraction volumique ϕ et l'amélioration du transfert de la chaleur convectif dépend de l'augmentation du nombre de Grashof.

Les deux courbes de nanoparticule Al_2O_3 et TiO_2 sont confondues avec un écart maximal de 0,005469 pour le nombre de Nusselt obtenu à la paroi inférieure chaude et de 0,006797 pour la paroi verticale chaude.

La comparaison entre le nombre de Nusselt moyen calculé au niveau de la paroi horizontale inférieure Nu_{moy} et le nombre de Nusselt moyen calculé au niveau de la paroi verticale droite Nu_{moy} , montre que la valeur maximale est obtenue au niveau de la paroi horizontale inférieure. Ceci avec l'utilisation des nanofluides, améliore le transfert de chaleur



(a)



(b)

Figure 4.10: Influence de la nature du nanofluid sur l'amélioration de transfert pour $\phi=0,04$

a) paroi horizontale inférieure et b) paroi verticale droite

La variation du nombre de Nusselt moyen au niveau de la paroi verticale droite en fonction du nombre de Grashof pour les différents rapports d'aspect et pour le nanofluid Al_2O_3+eau est représentée dans la figure 4.11. Les résultats sont présentés pour le cas de $\phi=0,04$. On remarque que le transfert de chaleur augmente avec la diminution du rapport d'aspect A. Ce résultat est logique car la circulation du fluide dans les petites cavités avec un gradient de température est plus élevée par rapport à celle des grandes cavités.

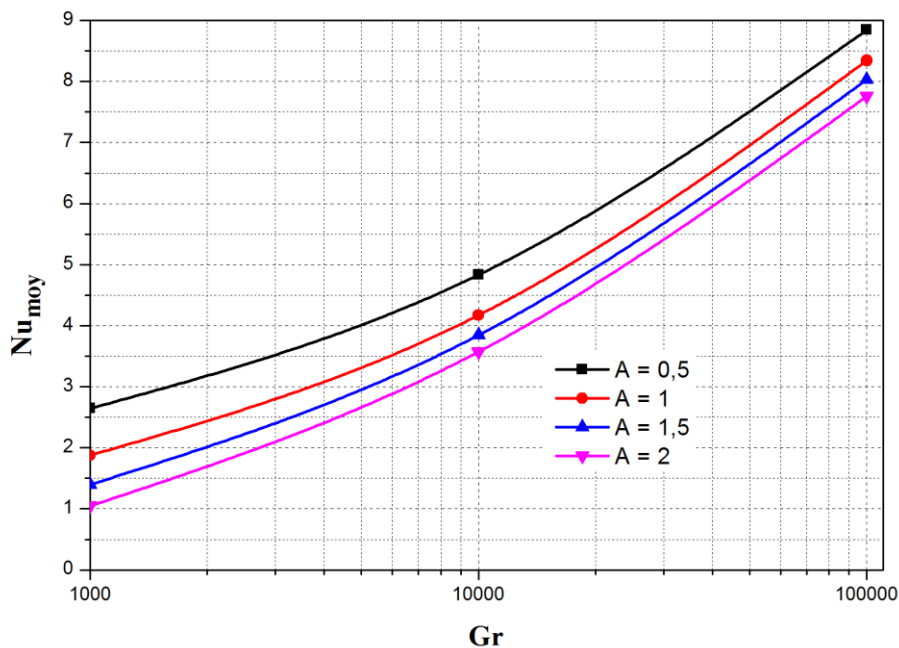


Figure 4.11: Influence de rapport d'aspect sur l'amélioration de transfert pour nanofluide $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{eau}, \phi=0,04$ et pour la paroi verticale droite

5. Conclusion

Dans ce travail, on a effectué une simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire. Pour voir l'influence du nombre de Grashof Gr , de la nature de nanofluide et de la fraction volumique des nanoparticules sur le champ d'écoulement et le transfert de chaleur. Les résultats montrent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Grashof Gr et la fraction volumiques des nanoparticules, la diminution de rapport d'aspect et pour le nanofluide Al_2O_3 .

*Conclusion
générale*

Dans ce mémoire, on a effectué une simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire dont la paroi horizontale inférieure et la paroi verticale droite sont chauffées à une température T_C . La paroi verticale gauche et la paroi horizontale supérieure sont à la température $T_F < T_C$, l'espace restant des parois formant la cavité est supposé adiabatique. En se basant sur les approximations de Boussinesq pour la convection naturelle, nous avons développé le modèle mathématique décrivant notre problème. Les hypothèses simplificatrices ont été introduites et justifiées. Le système d'équation simplifié résultant est résolu numériquement par la méthode des volumes finis. La simulation numérique a été faite avec le code du CFD (FLUENT version 6.3.26). La validation numérique de cette simulation a montré une bonne concordance entre nos résultats avec les résultats de ceux de [14]. L'objectif de cette étude voir l'effet de la fraction volumique des nanoparticules ϕ , de la nature des nanoparticules (Cu, Al_2O_3 et TiO_2) et du nombre de Grashof Gr sur l'amélioration de transfert de chaleur convectif.

Les principaux résultats de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- Le transfert de la chaleur convectif dépend de l'augmentation du nombre de Grashof.
- la nanoparticule Al_2O_3 favorise un bon transfert thermique par rapport les nanoparticules Cu et TiO_2 , ce qui montre que le transfert thermique ne dépend pas de la conductivité thermique des nanoparticules pour les faibles valeurs de la fraction volumique ϕ .

Notre étude s'est focalisée sur la problématique de la convection naturelle avec des parois planes en régime laminaire, il serait intéressant pour un travail futur d'explorer:

- les parois ondulées.
- les températures variables (sinusoïdales) au lieu les températures constantes.

Liste de références

- [1] **A. Bejan, D. Allan, Kraus**, 'Heat transfer handbook', TJ250.B35, 2003.
- [2] **S.B. Robert, C.H. Harry**, 'Transport phenomena', International Edition, 2003.
- [3] **I.J. Lieni Iqrd**, 'A heat transfer textbook', Third Edition, 2003.
- [4] **T. Jean**, 'Transferts couples dans les fluides', Editions DUNOD, paris, 2003.
- [5] **T. Jean, P. Jean P**, 'Transferts thermiques et massique', Editions DUNOD, paris, 2004.
- [6] **T. Ismail**, 'Modelling in transport phenomena', Elsevier Science B.v, 2002.
- [7] **O.Doche, J.A.Gruss and O.Soriano**, 'une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : le nanofluide', 2007
- [8] **A. Einstein**, 'Eine Neue Bestimmung der Moleküldimensionen', Ann. Phys. Leipzig; Vol. 19, pp. 289 – 306, 1906.
- [9] **H.C. Brinkman**, 'The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions', Journal of Chemical Physics, Vol. 20, N°4, pp. 571, 1952.
- [10] **C.J. Ho, M.W. Chen and Z.W. Li**, 'Numerical Simulation of Natural Convection of Nanofluid in a Square Enclosure: Effects Due to Uncertainties of Viscosity and Thermal Conductivity', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, N°17-18, pp. 4506 – 4516, 2008.
- [11] **J.C. Maxwell**, 'A Treatise on Electricity and Magnetism', UK: Clarendon, 1973
- [12] **K.S. Hwang, J.H. Lee and S.P. Jang**, 'Buoyancy-Driven Heat Transfer of Water Based Al₂O₃ Nanofluids in a Rectangular Cavity', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, N°9, pp. 4003 – 4010, 2007.
- [13] **B.C. Pak and Y.I. Cho**, 'Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles', Experimental Heat Transfer, Vol. 11, pp. 151 – 170, 1998.
- [14] **H.F. Oztop and E. Abu-Nada**, 'Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids', International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, N°5, pp. 1326 – 1336, 2008..
- [15] **J.I. Lage and A. Bejan**, 'The Resonance of Natural Convection in a Horizontal Enclosure Heated Periodically from the Side', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 36, N°6, pp. 2027 – 2038, 1992.
- [16] **E.K. Lakhali, M. Hasnaoui, P. Vasseur and E. Bilgen**, 'Natural Convection in a Square

- Enclosure Heated Periodically From Part of Bottom Wall’, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 27, N°3, pp. 319 – 333, 1995.
- [17] **M. Kazmierczak and Z. Chinoda**, ‘Buoyancy-Driven Flow in an Enclosure with Time Periodic Boundary Conditions’, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, N°6, pp. 1507 – 1519, 1992.
- [18] **S.M. Aminossadati**, ‘Hydromagnetic natural cooling of a triangular heat source in a triangular cavity with water-CuO nanofluid’, International Communications in Heat and Mass Transfer 43 (2013) 22–29
- [19] **G. Polidori, S. Fohanno, C.T. Nguyen**, ‘A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection’, International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 739–744.
- [20] **Y. He, Y. Men, Y. Zhao, H. Lu, Y. Ding**, ‘Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions’, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1965–1972
- [21] **Y.VAROL et al**, ‘Effects of inclination angle on conduction-natural convection in divided enclosures filled with different fluids’. International Communication in Heat and Mass Transfer 37 (2010)182-191.
- [22] **M. LAMSAADI, et al.** ‘ Etude analytique et numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire horizontale uniformément chauffée par le bas ‘. Tétouan-Maroc FIER 2002.
- [23] **K. Velusamy, T. Sundararajan, K.N. Seetharamu**, ‘Interaction effects between surface radiation and turbulent natural convection in square and rectangular enclosures’, J. Heat Transfer, Vol.123, pp 1063–1070, 2001.
- [24] **K. Khanafer and K. Vafai**, 'A critical Synthesis of Thermophysical Characteristics of Nanofluids', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 4410 – 4428, 2011.
- [25] **C. Rome**. Une méthode de raccordement de maillages non-conformes pour la résolution des équations de Navier-stokes, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux (2006).
- [26] **S.V. Patankar**, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere / McGrawHill, Washington D.C, 1980.
- [27] **M.A.BELMILOUD**. 'étude numérique de la convection mixte couplée a une radiation dans une cavite : cas des fluides non-newtoniens'. Thèse de doctorat 2016.

RESUME

La convection naturelle est étudiée numériquement dans une cavité rectangulaire dont la paroi horizontale inférieure et la paroi verticale droite sont chauffées à une température T_C . La paroi verticale gauche et la paroi horizontale supérieure sont à la température $T_F < T_C$, l'espace restant des parois formant la cavité est supposé adiabatique. On utilise le nanofluid avec trois différents types de nanoparticules (Cu, TiO_2 et Al_2O_3). La fraction volumique des nanoparticules est prise dans l'intervalle $0,01 \leq \phi \leq 0,04$. Le nombre de Grashof est compris entre 10^3 et 10^5 , et le nombre de Prandtl est fixé à $Pr = 6,2$. L'objectif de cette étude d'étudier l'effet de la nature de nanofluides, de la fraction volumique des nanoparticules et la variation du nombre de Grashof sur l'amélioration du transfert de chaleur convectif. Les résultats de la simulation montrent que le transfert thermique augmente avec l'augmentation du nombre Grashof, et de la fraction volumique. Cette augmentation du transfert de chaleur est remarquable pour le nanofluid Al_2O_3 -eau

Mots clés : Convection naturelle, cavité rectangulaire, nombre de Grashof, La fraction volumique des nanoparticules et nanofluides.

ABSTRACT

Natural convection is studied numerically in a rectangular cavity whose lower horizontal wall and right vertical wall are heated to a temperature T_C . The left vertical wall and upper horizontal wall are at a temperature $T_F < T_C$, the remaining space in the cavity is considered adiabatic. We used a nano fluid with three different types of nano particles (Cu, TiO_2 and Al_2O_3). The volumetric fraction of the nanoparticles is taken from the interval $0.01 \leq \phi \leq 0.04$. The Grashof number is between 10^3 and 10^5 , and the Prandtl number was fixed at $Pr = 6.2$. The objective of this work was to study the effect of the nature of the nanofluid, the volumetric fraction of the nanoparticles and the variation of the Grashof number on the improvement of the convective heat transfer. The simulation results show that the heat transfer increases with the Grashof number and the volumetric fraction. This increase is mostly notable for the nanofluid Al_2O_3 -Water.

Keywords: Natural convection, rectangular cavity, Grashof number, The volume fraction of nanoparticles and nanofluids.

الملخص

تمت دراسة الحمل الحراري الطبيعي عددياً في تجويف مستطيل حيث يتم تسخين الجدار الأفقي السفلي والجدار العمودي الأيمن بدرجة حرارة ثابتة T_C بينما تم تسخين الجدار العمودي الأيسر والجدار الأفقي العلوي بدرجة حرارة أقل من الأولى حيث $T_F < T_C$ ، أما باقي الجدران لها تبادل حراري منعدم. بحيث استخدمنا ثلاثة أنواع مختلفة من الجسيمات الصغيرة النانوية (Cu, TiO_2 and Al_2O_3).، ثم أخذنا الجزء الحجمي للجسيمات النانوية بين $0.01 \leq \phi \leq 0.04$. بحيث يتراوح رقم جراشوف (Grashof) بين 10^3 و 10^5 ، وتم تثبيت رقم براندل (Prandtl) عند $Pr = 6,2$. لدراسة تأثير طبيعة السائل المستعمل والجزء الحجمي للجسيمات النانوية وتغير رقم جراشوف (Grashof) على تحسين انتقال الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي. أظهرت نتائج المحاكاة أن انتقال الحرارة يزداد مع زيادة عدد الجراشوف والجزء الحجمي للجسيمات النانوية. هذه الزيادة ملحوظة في الغالب بالنسبة لسائل ماء+ أكسيد الألمنيوم

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، التجويف المستطيل، رقم جراشوف، الجزء الحجمي للجسيمات النانوية والسوائل النانوية.