

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



## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

### **MASTER**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Génie Mécanique

**Parcours** : Master

**Spécialité** : Énergétique

**Thème**

# **Convection naturelle d'un nanofluide confiné dans une cavité triangulaire**

Préparé par :

**AMOUR** Abdelillah et **GOUDJIL** Toufik

Soutenu publiquement le : 20/ 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. MOULGADA Abdelmadjid	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Président
M. MEKROUSSI Said	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Examinateur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examinateur
M. BELMILOUD Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# Remerciements

*Au premier lieu, nous louons dieu tout puissant de nous avoir donné le courage d'achever ce travail.*

*Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur **Mr BELMILOUD M.A**, qui nous a suivi et conseillé durant l'étude du projet.*

*Nous adressons aussi nos remerciements les plus sincères aux membres de jury **M. MOULGADA Abdelmadjid M. MEKROUSSI Said M. HAMMOU Mahmoud** d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nos remerciements s'adressent à tous les enseignants qui ont contribué à notre réussite dans nos études, depuis notre première année scolaire jusqu'à la dernière année universitaire.*

*Nous tenons à remercier particulièrement nos familles qui nous ont encouragé et soutenu durant notre parcours d'études. Amis, proches, tous ceux qui nous ont attribué leur aide de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents*

*À mon frère et mes sœurs*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis(es)*

# Table des matières

	Page
Remerciements.....	i
Dédicaces .....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures et Liste des tableaux .....	iv
Nomenclature .....	vi
Introduction générale .....	2
<b>Chapitre 1 : Etude bibliographique</b>	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Définitions.....	4
1.3 Notion de Base .....	4
1.3.1 Chaleur.....	4
1.3.2 Température .....	5
1.3.3 Flux thermique .....	5
1.3.4 Transfert de chaleur .....	5
1.4 Mode de transfert de chaleur.....	6
1.4.1 Transfert de chaleur par convection.....	6
1.4.1.1 Différents types de convection .....	7
a) Convection forcée.....	7
b) Convection naturelle.....	8
c) Convection mixte .....	9
1.4.2 Transfert de chaleur par conduction.....	9
1.4.2.1 Loi de Fourier .....	10
1.4.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	11
1.5 Les nombres sans dimension.....	11
1.5.1 Le nombre de Reynolds .....	11
1.5.2 Le nombre de Prandtl .....	12
1.5.3 Le nombre de Nusselt .....	12
1.5.4 Le nombre de Grashof.....	12
1.5.5 Le nombre de Rayleigh .....	12
1.6 Régimes d'écoulement.....	12
1.6.1 Écoulement laminaire .....	13
1.6.2 Écoulement turbulent .....	13

1.7	Généralités sur les nanofluides .....	13
1.7.1	Introduction.....	13
1.7.2	Définition .....	14
1.7.3	Fabrication et préparation des nanofluides .....	14
1.7.3.1	Procédé en une étape (one-step method) .....	14
1.7.3.2	Procédé en deux étapes (two-step method) .....	14
1.7.4	Nanoparticules et les fluides porteurs .....	15
1.7.5	Les applications des nanofluides.....	16
1.7.6	Les avantages est les inconvénients des nanofluides .....	16
1.7.6.1	Les avantages des nanofluides.....	16
1.7.6.2	Les inconvénients des nanofluides .....	17
1.8	Revue bibliographique .....	17
2.1	Introduction.....	21
2.2	Description du problème .....	21
2.2.1	Hypothèses simplificatrices .....	22
2.2.2	Approximation de Boussinesq .....	22
2.3	Les paramètres thermophysiques des nanofluides .....	23
2.3.1	Masse volumique .....	23
2.3.2	Viscosité dynamique .....	23
2.3.3	Chaleur spécifique.....	23
2.3.4	Conductivité thermique.....	24
2.4	Les équations gouvernantes .....	24
2.4.1	Equation de continuité .....	24
2.4.2	Equation de quantité de mouvement.....	24
2.4.3	Equation de conservation de l'énergie .....	25
2.5	Conditions aux limites .....	25
2.6	Nombre de Nusselt.....	25
2.7	Conclusion .....	25
3.1	Introduction.....	27
3.2	Maillage .....	27
3.2.1	Maillage structure (QUADRA/HEXA) .....	27
3.2.2	Maillage non structure (TRI/TETRA.) .....	28
3.2.3	Maillage hybride .....	28
3.3	Structure du code Fluent .....	29
3.4	Simulation sous Fluent.....	29
3.4.1	Lancement de Fluent.....	30
3.4.2	Importation de la géométrie (*.msh).....	30

3.4.3	Vérification du maillage importé .....	31
3.4.4	Vérification de l'échelle.....	31
3.4.5	Choix du Solveur .....	32
3.4.6	Équation de l'énergie .....	32
3.4.7	Définition des caractéristiques du fluide.....	33
3.4.8	Conditions de la zone cellulaire .....	34
3.4.9	Conditions aux limites usuelles.....	34
3.4.10	Méthode de solution.....	35
3.4.11	Initialisation du calcul.....	35
3.4.12	Choix des critères de convergence.....	36
3.4.13	Lancement du calcul .....	37
3.5	Conclusion .....	37
4.1	Introduction.....	39
4.2	Validation numérique .....	39
4.3	Maillage du domaine .....	39
4.4	Résultats et discussions .....	40
4.4.1	Les contours de vitesse et les lignes isothermes.....	40
4.4.2	Variation du nombre de Nusselt moyen .....	46
4.5	Conclusion.....	50
	Conclusion générale .....	52
	Liste de références.....	54
	Résumé	

# Liste des figures et des tableaux

# Liste des figures

	<b>Page</b>
Figure 1.1 : Combinaison des trois modes de transfert de chaleur.....	6
Figure 1.2 : Action de fluide en mouvement dans la convection.....	7
Figure 1.3 : Le phénomène de la convection forcée.....	8
Figure 1.4 : Présentation de la convection dans une casserole.....	8
Figure 1.5 : Le phénomène de la convection mixte.....	9
Figure 1.6 : principe de la conduction thermique.....	9
Figure 1.7 : Conduction dans une couche élémentaire de mur plan.....	10
Figure 1.8 : Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre.....	15
Figure 1.9 : les nanoparticules et liquides de base les plus utilisés.....	16
Figure 2.1 : Schéma du problème physique .....	21
Figure 3.1 : Maillage structuré.....	27
Figure 3.2 : Maillage non structuré.....	28
Figure 3.3 : Maillage hybride.....	28
Figure 3.4 : schéma structure de code (FLUNET).....	29
Figure 3.5 : Vue globale de Fluent.....	30
Figure 3.6 : Exportation du fichier mesh.....	30
Figure 3.7 : Vérification du maillage sous Fluent.....	31
Figure 3.8 : Vérification des unités.....	31
Figure 3.9 : Le choix de schéma de résolution.....	32
Figure 3.10 : Equation de l'énergie.....	33
Figure 3.11 : Définition des caractéristiques du fluide.....	33
Figure 3.12 : Choix du fluide utilisé.....	34
Figure 3.13 : les conditions aux limites.....	34
Figure 3.14 : la méthode solution.....	35
Figure 3.15 : Initialisation de la solution.....	36
Figure 3.16 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.....	36
Figure 3.17 : Choix du nombre des itérations.....	37
Figure 4.1 : L'influence du nombre de Rayleigh $Ra$ sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour $h = 0,25H$ et $\phi = 0,01$ .....	41
Figure 4.2 : L'influence de la concentration volumique $\phi$ sur les lignes de courant et les	43



lignes isothermes pour $Ra = 10^5$ et $h = 0,5H$ .....	
Figure 4.3 : L'influence de la position de la source $h$ sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour $Ra = 10^5$ et $\phi = 0,03$ .....	44
Figure 4.4 : L'influence de la forme de la source sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour $\phi = 0,05$ et $h = 0,25H$ .....	46
Figure 4.5 : L'effet de la concentration volumique de nanofluide sur le nombre de Nusselt moyen pour $h = 0,25H$ et diamètre de la source $D = 0,1L$ .....	47
Figure 4.6 : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh $Ra$ pour $\phi = 0,05$ et diamètre de la source $D = 0,1 L$ .....	48
Figure 4.7 : L'effet de la position de la source sur le nombre de Nusselt moyen pour $\phi = 0,05$ et diamètre de la source $D = 0,1L$ .....	49
Figure 4.8 : L'effet de la taille de la source sur le nombre de Nusselt moyen et pour $\phi = 0,05$	49

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés thermo-physiques du fluide pur et de nanoparticule.....	21
Tableau 4.1 : Comparaison des valeurs moyennes du nombre de Nusselt $Nu_{moy}$ de la cavité du code.....	39
Tableau 4.2 : Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ $TiO_2$ , $Ra = 10^6$ , $\phi = 0.01$ , $h = 0,5H$ et pour diamètre de la source $D = 0,1 L$ .....	40

# **Nomenclatures**

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
Cp	Capacité calorifique à pression constante	[J/Kg.k]
g	Accélération de pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
Gr	Nombre de Grashof	[-]
H	Hauteur de la cavité	[m]
H	Hauteur de source	[m]
L	Longueur de la cavité	[m]
D	Diamètre de source	[m]
K	Conductivité thermique	[W/m.K]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
P	Pression	[N/m <sup>2</sup> ]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
Ri	Nombre de Richardson	[-]
S	Surface	[m <sup>2</sup> ]
T	Température	[K]
T <sub>0</sub>	Température de référence	[K]
ΔT	Différence de température	[K]
u,v	Composante du vecteur de vitesse suivant x et y	[m/s]
x,y	Coordonnées cartésiennes	[m]
X, Y	Cordonnées cartésiennes adimensionnelles	[-]
U, V	Composante adimensionnelle du vecteur	[-]

### **Symboles grecs**

β	Coefficient de dilatation Thermique	[k <sup>-1</sup> ]
ρ	Masse volumique	[kg /m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>0</sub>	La masse volumique à Température T <sub>0</sub>	[kg /m <sup>3</sup> ]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
ν	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
φ	Concentration volumique	[-]
φ	Flux de chaleur surfacique	[W/m <sup>2</sup> ]
Φ	Flux de chaleur	[W]

## Indices et exposants

nf	nanofluide
np	nanoparticule
f	fluide de base
C	Paroi chaude
F	Paroi froide
Moy	la valeur moyenne

# **Introduction générale**

Le transfert de chaleur joue un rôle important dans divers processus industriels dont l'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo physique des fluides utilisés. Bien qu'il se manifeste sous diverse forme : rayonnement, conduction et convection. Cette dernière est la plus visée en raison de son importance et de ses applications dans divers domaines tels que le refroidissement des processus, des composants de système électronique, les collecteurs d'énergie solaire et les échangeurs de chaleur. On sait que les transferts par convection peuvent être augmentés de manière passive en modifiant la configuration de l'écoulement ou en augmentant les surfaces d'échange entre la paroi et le fluide. [1]

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 géant la convection. L'intérêt de telles études réside dans son implication dans de nombreuses applications industrielles.

Avec l'émergence et le développement rapide des nanosciences et des nanotechnologies dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, la convection a pris une grande part de ce développement, et a pris un autre aspect d'amélioration. C'est au niveau de l'échelle nanométrique du milieu convectif que les travaux récents se sont concentrés. L'idée est d'augmenter le transfert de chaleur en introduisant dans ces fluides une faible concentration de particules de taille nanométrique ( $10^{-9}$ m) pour augmenter la conductivité thermique effective du mélange. [1]

Dans le présent travail, nous étudions numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle en régime laminaire dans une cavité triangulaire remplie de nanofluide contenant d'une source de chaleur constante. Dans notre cas, on analysera particulièrement l'influence de certains paramètres sur les conditions d'écoulement et de transferts de chaleur dans la cavité.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres, répartis comme suit :

- Le premier chapitre expose des généralités et étude bibliographique, la convection naturelle dans des cavités en présence de nanofluide numériquement.
- La configuration étudiée ainsi que le modèle mathématique adopté de même que conditions aux limites associées constituent le contenu du deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est une présentation de la simulation numérique.
- Le quatrième chapitre, est consacré à la validation des résultats, l'interprétation et commentaires des différents résultats des simulations conduites. Enfin, une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus au cours de cette étude de même que quelques perspectives sont donnée.

# **Chapitre 1 :**

# **Etude bibliographique**

## **1.1 Introduction**

La théorie de transfert de chaleur est une science, qui étudie la façon, dont la chaleur se propage d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de température. Le transfert de chaleur est fréquemment rencontré dans la nature et dans différents systèmes industriels. Il résulte d'une interaction complexe au sein d'un milieu ou entre milieux dès qu'il y a un gradient de température. Cette interaction est responsable de la diversité des écoulements qui en découlent. La convection est composée des trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) qui a une importance vitale aussi bien dans le domaine fondamental que dans les domaines industriels telles que : le refroidissement des composants électroniques, la climatisation, les échangeurs de chaleur, les centrales nucléaires, les capteurs solaires...etc.

## **1.2 Définitions**

Le transfert de chaleur est la science qui cherche à étudier le transfert d'énergie qui peut avoir lieu entre les corps matériels en raison d'une différence de température, les trois modes de transfert de chaleur sont [2] :

- la conduction
- la convection
- le rayonnement

Dans ce chapitre, nous cherchons à expliquer le mécanisme de ces modes qualitativement de sorte que chacun peut être considéré dans sa juste perspective.

## **1.3 Notion de Base**

### **1.3.1 Chaleur**

En physique, on appelle chaleur une forme particulière de l'énergie. Cette équivalence de la chaleur et du travail constitue le premier principe de la thermodynamique. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité : Le Joule. A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de quantité de chaleur et de différence de température.

Le transfert de chaleur d'une partie d'une substance à une autre partie, ou d'un corps à un autre corps, s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée. Ce transfert est le fait d'une différence de température entre les deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier, dans la mesure où le volume des deux corps reste constant. Ceci constitue le second principe de la thermodynamique. Ce



second principe met en évidence la notion d'irréversibilité : La chaleur ne pourra pas se propager d'un corps froid vers un corps chaud, sauf si on fournit un travail [3].

### 1.3.2 Température

Elle se définit en chaque point d'un corps liquide, solide ou gazeux. C'est une fonction scalaire de l'espace et du temps lorsque le problème en dépend (problème instationnaire). L'unité de température est Kelvin (K) ou encore le degré Celsius (°C) [2].

### 1.3.3 Flux thermique

On appelle flux thermique à travers une surface S la quantité de chaleur qui traverse cette surface par unité de temps. [4].

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.1)$$

$\Phi$  : Flux de chaleur (W).

$dQ$  : Quantité de chaleur élémentaire (J).

$dt$  : Interval de temps (s).

La quantité de chaleur transmise par unité de temps et de surface est appelée densité de flux de chaleur. [4].

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.2)$$

Avec :

$\varphi$  : Densité de flux de chaleur ( $W \cdot m^{-2}$ ).

$d\Phi$  : Flux de chaleur (W).

$dS$  : Surface ( $m^2$ )

### 1.3.4 Transfert de chaleur

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnels afin d'établir les proportions de transfert d'énergie.

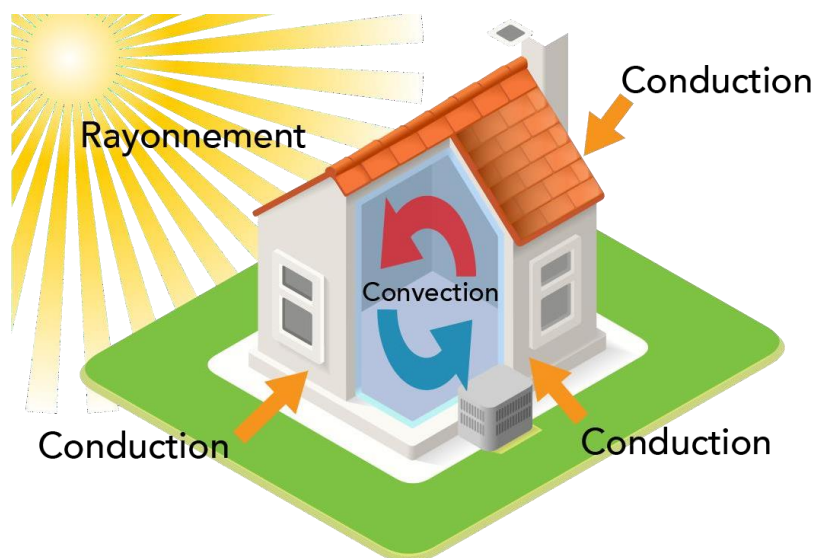
Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établi. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement [5].

## 1.4 Mode de transfert de chaleur

Dans l'étude du transfert thermique on distingue trois modes de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Le premier phénomène, la conduction, a lieu dans les solides. La convection se rencontre spécialement dans les fluides, elle traduit le transfert de chaleur d'un point à un autre à l'intérieur d'un fluide (gaz ou liquide) par déplacements des particules de ce fluide.

L'apport de chaleur par rayonnement peut avoir lieu dans tous les milieux transparents aux ondes électromagnétiques. En réalité la distribution de la température, dans un milieu, est la conséquence des effets de ces trois modes de transfert thermique ; il est impossible d'isoler un mode de transfert thermique d'un autre mode. Pourtant, dans le cas où l'un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants, aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné.

Une grandeur souvent utilisée dans l'étude du transfert thermique est la densité du flux thermique qui représente la chaleur traversant l'unité de surface et par unité de temps. La **figure 1.1** englobe les trois modes de transfert de chaleur [6].



**Figure 1.1** : Combinaison des trois modes de transfert de chaleur.

### 1.4.1 Transfert de chaleur par convection

C'est un transfert qui résulte d'un mouvement d'ensemble du matériau le supportant. La convection a donc lieu dans les fluides (gaz ou liquides). Elle caractérise l'échange de chaleur à la frontière entre un solide et un fluide et est donc très liée à l'écoulement fluide mais aussi aux géométries de frontière et aux états de surface solide. Il convient de distinguer la convection forcée dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieur (pompe,

ventilateur...) de la convection naturelle dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple). De façon macroscopique elle est décrite par la loi de Newton (1701) qui lie le flux à un écart de température [7].

$$\Phi = h \cdot S(T_p - T_f) \quad (1.3)$$

Avec :

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W).

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$ ).

$T_p$  : Température de surface du solide ( $^{\circ}C$ ).

$T_f$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^{\circ}C$ ).

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ ).

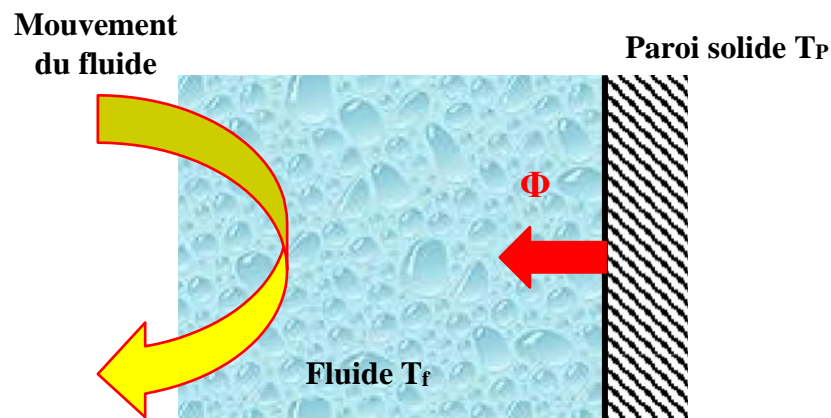


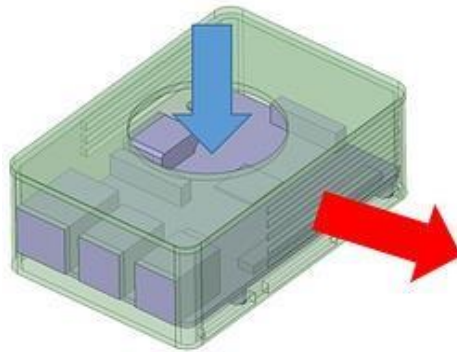
Figure 1.2 : Action de fluide en mouvement dans la convection.

#### 1.4.1.1 Différents types de convection

##### a) Convection forcée

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques, c'est donc un gradient de Pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de La transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de L'écoulement des fluides.

La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative. [8].



**Figure 1.3 :** le phénomène de la convection forcée.

La relation générale pour la convection forcée est  $Nu = f(Re, Pr)$ .

En microélectronique, le transfert de chaleur obéit alors à l'expression suivant :

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \quad (1.4)$$

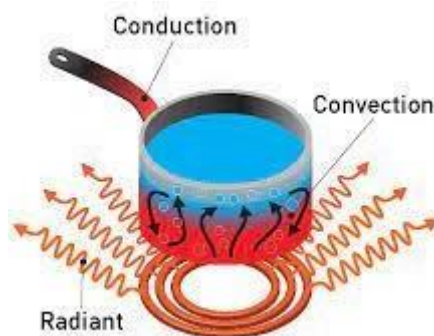
Où : C, n et m sont des constantes dépendant des caractéristiques du solide et du fluide [8].

### b) Convection naturelle

C'est celle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de Densité, celles - mêmes dues à des différences de température existant dans le fluide.

La convection naturelle dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluides. La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide.

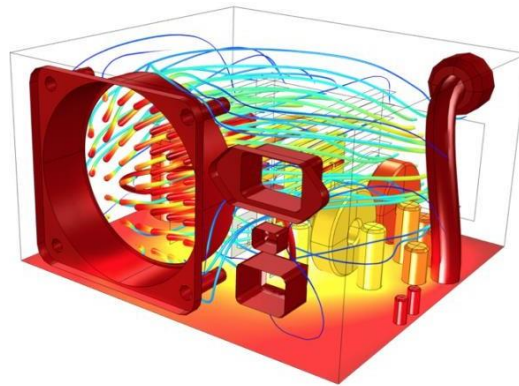
On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur, Par exemple, dans les échangeurs de chaleur où deux fluides en mouvement, séparés par une paroi solide s'échange de l'énergie [9].



**Figure 1.4 :** Présentation de la convection dans une casserole.

### c) Convection mixte

Il existe une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée (frontière entre la convection libre et la Convection forcée).



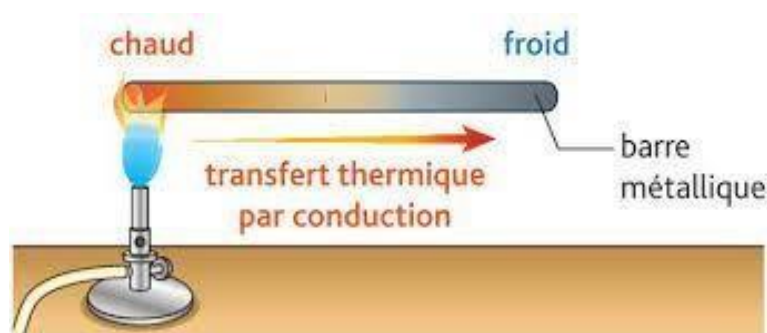
**Figure 1.5 :** le phénomène de la convection mixte.

Le groupe adimensionnel qui détermine laquelle de ces convections est dominante est le nombre de Richardson Ri qui est le rapport du nombre de Grashof sur le carré du Nombre de Reynolds [8].

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (1.5)$$

#### 1.4.2 Transfert de chaleur par conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents : une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction [5].



**Figure 1.6 :** principe de la conduction thermique.

### 1.4.2.1 Loi de Fourier

Pour un milieu isotrope, à travers une surface isotherme montre que le flux thermique, par conduction, dans une direction donnée est proportionnel à l'aire  $A$  normale à la direction du flux thermique et au gradient de température à cette direction. Le flux thermique, dans la direction  $x$ , par exemple, conformément à la loi de Fourier [10]. Equation (1.6), établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822 [11].

$$\Phi = -k \frac{dT}{dx} S \quad (1.6)$$

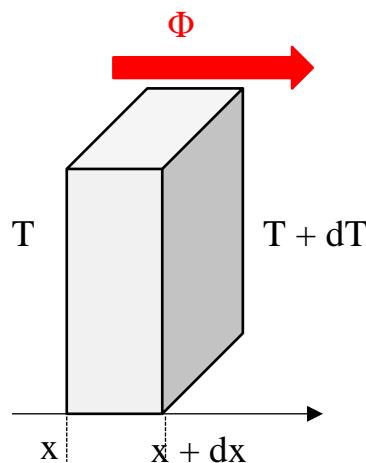
$$\varphi = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.7)$$

Le coefficient de proportionnalité  $k$ , appelé coefficient de conductivité thermique, dépend de la substance (nature, structure, température, pression, densité, etc.); il se mesure en  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  et il est toujours positif car la chaleur se transmet des zones chaudes vers les zones froides. Si la température décroît dans la direction positive  $x$ , alors  $\frac{dT}{dx}$  est négatif. Le flux thermique  $\Phi$  et la densité du flux thermique  $\varphi$  étant des quantités positives dans la direction positive  $x$ , alors il est nécessaire d'introduire le signe moins dans le membre droit des expressions (1.6) et (1.7). Si le membre droit des expressions (1.6) et (1.7) est négatif alors le flux thermique (et également la densité du flux thermique) est orienté dans la direction négative  $x$ .

Dans le cas général, dans l'espace à plusieurs dimensions, la loi de Fourier est donnée par la relation :

$$\Phi = -k \cdot \nabla T \cdot S \quad (1.8)$$

En général la conductivité thermique  $k$  varie en fonction de la température. À des basses températures, cette variation peut être négligée [12].



**Figure 1.7 :** Conduction dans une couche élémentaire de mur plan.

### 1.4.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est l'action et l'effet rayonner (irradier/propager des rayons de lumière, de chaleur ou de toute autre énergie). Pour la physique, il s'agit de l'énergie ondulatoire ou des particules matérielles qui se propagent à travers l'espace. Il y a plusieurs types de rayonnement. Le rayonnement électromagnétique est celui qui consiste en la propagation d'énergie au moyen de la combinaison de champs électriques et magnétiques oscillants. On entend par spectre électromagnétique la distribution énergétique des ondes électromagnétiques, allant des rayons gamma (dont la longueur d'onde se mesure en picomètres) aux ondes de radio (avec des longueurs d'onde pouvant être mesurées en kilomètres).

- Le rayonnement corpusculaire consiste en la propagation de particules sous atomiques qui se déplacent à grande vitesse à caractère ondulatoire. Ces particules peuvent être chargées ou déchargées du point de vue électrique.
- Le rayonnement solaire est l'ensemble des rayonnements électromagnétiques émis par le Soleil et qui déterminent la température sur la Terre.
- Le rayonnement ionisant, à son tour, propage l'énergie suffisante pour ioniser la matière. Autrement dit, le rayonnement ionisant produit des ions et extrait les électrons de l'état lié à l'atome [13].

## 1.5 Les nombres sans dimension

L'expérimentation est souvent menée à une échelle différente de la réalité industrielle. La nécessité de définir des corrélations qui soient applicables à des appareils de tailles différentes opérant dans des situations différentes conduit à l'utilisation de paramètres adimensionnels qui permettent de définir des similitudes [14].

### 1.5.1 Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il peut être exprimé comme :

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (1.10)$$

Où

V : La vitesse moyenne [m/s].

L : La longueur caractéristique [m].

Le nombre de Reynolds permet de quantifier les écoulements laminaires et turbulents. Les écoulements à nombre de Reynolds élevé sont généralement turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires.

### 1.5.2 Le nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl décrit le rapport entre la diffusion de la quantité de mouvement et la diffusion de la chaleur dans le fluide, il s'écrit :

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.11)$$

Avec  $\nu$  et  $\alpha$  sont respectivement la viscosité cinématique et la diffusivité thermique.

### 1.5.3 Le nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt décrit le rapport entre l'échange par convection et celui de conduction dans la couche de fluide, il s'écrit :

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{K} \quad (1.12)$$

Avec  $h$  le coefficient de transfert de chaleur et  $k$  la conductivité thermique.

### 1.5.4 Le nombre de Grashof

Représente la comparaison entre la force de poussée consécutive à l'échauffement et la force de viscosité. Il compare les effets de la gravité avec les effets de dissipation thermique dus à la viscosité, il s'écrit :

$$\text{Gr} = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\mu^2} \quad (1.13)$$

Avec  $g$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  sont respectivement la gravité, le coefficient de dilatation thermique, la masse volumique et la viscosité dynamique,  $\Delta T$  étant l'écart de température entre les parois et  $L$  une longueur caractéristique.

### 1.5.5 Le nombre de Rayleigh

Il exprime le rapport entre les forces de poussées par les effets visqueux et la diffusion thermique. Il caractérise la vigueur de la convection naturelle. Pour une condition de température imposée (Dirichlet), le nombre de Rayleigh (Ra) est la combinaison du nombre de Grashof et du nombre de Prandtl, il s'écrit :

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (1.14)$$

## 1.6 Régimes d'écoulement

L'écoulement d'un fluide, peut se produire de deux façons différentes, selon les conditions locales de vitesse. En effet, depuis très longtemps, on a observé qu'à faible vitesse, l'écoulement se faisait de telle façon qu'en régime permanent, les lignes de courant sont stables et ne se mélangent



pas. Dans cet écoulement, appelé laminaire, les couches fluides glissent les unes sur les autres et il n'y a pas de transfert de particules d'un filet fluide à un autre.

Par ailleurs, lorsque la vitesse croît, les filets fluides paraissent osciller et vibrer, puis ils perdent leur identité propre. Dans ce régime, appelé turbulent, les particules oscillent rapidement autour de leur trajectoire [15].

### **1.6.1 Écoulement laminaire**

Dans ce type d'écoulement les fluides ne se mélangent pas et la trajectoire de chaque particule de fluide est parallèle aux autres. Dans ce cas le transfert thermique s'effectue par conduction entre les différentes couches

### **1.6.2 Écoulement turbulent**

Au sein du fluide en écoulement turbulent, la chaleur se transmet par mélange des particules de fluide et donc la température du fluide s'égalise rapidement. Néanmoins, dans un écoulement visqueux, dans une direction perpendiculaire à la paroi il existe une couche limite de fluide dont l'écoulement peut être considéré comme laminaire.

L'épaisseur de ce film laminaire dépend des propriétés physiques et de la nature de l'écoulement mais dans ce film le transfert se fait par conduction.

## **1.7 Généralités sur les nanofluides**

### **1.7.1 Introduction**

L'efficacité d'un processus de transfert thermique est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est conditionnée par la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein des appareillages. Le considérable récent développement des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon non négligeable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de " Nanofluides ". Ce terme a été introduit par Das et al [16] au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale. Dans cette étude on essaiera de montrer la potentialité de remplacer les fluides avec des nanofluides qui peuvent jouer le même rôle que ces fluides ordinaires mais avec une bonne efficacité du dégagement de la chaleur. L'adjonction des particules métalliques dans un fluide a mis en évidence une nette amélioration des capacités Thermiques de celui-ci. Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique posent des problèmes de sédimentation des particules causant des chutes de

pression lors de l'écoulement. Actuellement, il est possible de fabriquer des particules de l'ordre du nanomètre qui remédient à ces problèmes [15].

### **1.7.2 Définition**

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométriques en suspension dans un liquide. Les études de ces fluides composites montrent des aptitudes particulièrement intéressantes du fait d'une meilleure conductivité thermique et d'un coefficient d'échange convectif significativement accru par rapport à des liquides classiques, l'eau en particulier. Une telle augmentation de la conductivité thermique du nanofluide ne peut pas seulement être imputée à la plus grande conductivité thermique des nanoparticules en suspension, l'amélioration vient d'une combinaison de plusieurs facteurs physiques simultanés.

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégaions, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule [17].

### **1.7.3 Fabrication et préparation des nanofluides :**

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories [16] :

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la préparation chimique...

En général, les nanoparticules utilisées pour la synthèse de nanofluides sont à base d'oxydes, de nitrures, de carbures, de métaux purs ou d'alliages, de nanotubes de carbone désignés par (NTC). On trouve également des particules composites pouvant utiliser des polymères. Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide [16] :

#### **1.7.3.1 Procédé en une étape (one-step method) :**

Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse direct dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur [16].

#### **1.7.3.2 Procédé en deux étapes (two-step method):**

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base .Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de travaux de recherche pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre pour obtenir des particules de taille voulue [16].

Chaque méthode a ses inconvénients et certaines ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé, notamment les méthodes en une étape. Les principaux moyens de fabrications peuvent être:

- Le mécano synthèse (broyage à haute énergie) ;
- La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple) ;
- Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur ;
- La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques ;
- La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser) ;
- La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs).

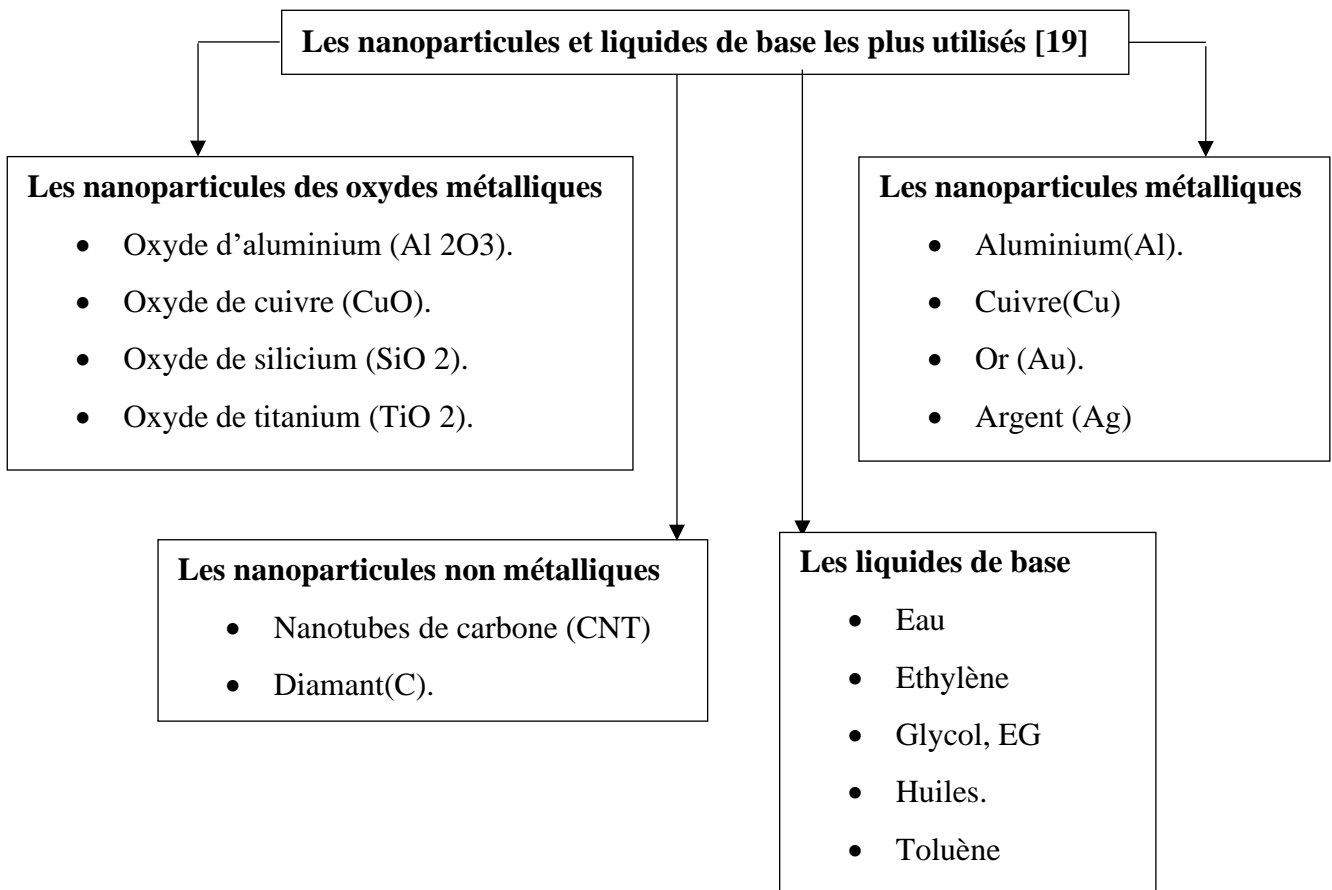
#### 1.7.4 Nanoparticules et les fluides porteurs

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm).



**Figure 1.8:** Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre

Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires [18].



**Figure 1.9:** les nanoparticules et liquides de base les plus utilisés

### 1.7.5 Les applications des nanofluides

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électro-mouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées. En thermique, les nanofluides 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 nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [19, 20].

### 1.7.6 Les avantages et les inconvénients des nanofluides

#### 1.7.6.1 Les avantages des nanofluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules.

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

#### 1.7.6.2 Les inconvénients des nanofluides

- Fortes pertes de charge.
- Erosion
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

### 1.8 L'état de l'art

**Boudaoud [21]** ont étudié numériquement les phénomènes de la convection et de la génération d'entropie d'un nanofluide  $Al_2O_3$  à base d'eau pure dans une cavité carrée simple, et une autre ondulée. Comme conclusions, Les résultats montrent que le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique, et l'ajout de nanoparticules dans le liquide pur diminue la génération d'entropie, où l'entropie thermique la plus basse est obtenue pour le cas de  $Ra$  égal à  $10^4$ . En outre, il y'a une relation proportionnelle établie entre  $Ra$  et les deux autres paramètres (nombre de Nusselt et génération d'entropie).

**Ouyahia et al [22]** a réalisé une étude numérique des caractéristiques thermo-hydrauliques d'un nanofluide  $TiO_2$  dans une cavité triangulaire isocèle. Les parois inclinées de cette dernière sont isothermes froides, tandis que la base est isolée thermiquement. D'autre part, la cavité est munie d'une source de chaleur isotherme chaude. Ont conclu que L'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie les champs de vitesse et de température, induisant ainsi un passage d'un mode de conduction en un mode de convection, L'agitation de nanoparticules pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh affaiblit l'écoulement alors qu'il améliore le transfert thermique en particulier.

- Le fractionnement de la source de chaleur suscite une augmentation du nombre de Nusselt moyen de la cavité en particulier, lors d'un fractionnement vertical (Cas 1). Le déplacement de la source de chaleur depuis la base de la cavité jusqu'au sommet donne place à un mécanisme de transfert thermique en mode de conduction.

**Aminossadati et Ghasemi [23]** étudie un problème de convection naturel d'un nanofluide newtoniens, incompressibles, laminaire et en équilibre thermique dans une cavité carrée munie d'une source de chaleur située sur la paroi inférieure, Avec un nombre de Rayleigh allant de ( $10^3$  à  $10^6$ ). Ont conclu que la température augmente en présence de nanofluide et réduit la force de champ d'écoulement.

**Ghasemi et Aminossadat [24]** étudie un problème de convection naturelle dans une cavité triangulaire contenant un nanofluide (eau-CuO) avec une source de chaleur située sur la paroi verticale. Ils ont constaté que pour toutes les fractions volumiques, le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. De même que la position de la source de chaleur a un effet considérable sur le taux de transfert de chaleur.

**Boudjeniba et al [25]** ont étudié numériquement les transferts de chaleur par convection naturelle qui se développe à l'intérieur d'une cavité fermée rectangulaire contenant un nanofluide (eau + cuivre). La paroi horizontale inférieure est partiellement chauffée et les deux parois verticales de gauche et de droite sont refroidies sur leurs moitiés supérieures. Le reste des frontières est thermiquement isolé. Le nombre de Rayleigh est un paramètre de l'étude avec la fraction volumique et le facteur de forme de la cavité. Résultats issus de cette étude sont Le transfert de chaleur est meilleur quand l'élément chauffant est centré. L'augmentation du nombre de Rayleigh tend à l'amélioration du transfert de chaleur, plus précisément pour des petits allongements c'est-à-dire  $<1$ . Mais l'intensification des transferts de chaleur causée par l'ajout des nanoparticules est plus importante pour des cavités rectangulaires peu allongées.

**Oztop et al [26]** ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire partiellement chauffée sur une face latérale contenant des nanofluides. 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.

**Souici et ksouri [1]** ont étudié numériquement les transferts de chaleur par convection naturelle dans une cavité carrée partiellement chauffée en présence de deux fluides non miscible (air / nanofluide). Leurs résultats indiquent que le nombre de Nusselt local augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et le rapport d'aspect (A), alors qu'ils diminuent avec l'augmentation de longueur de l'appareil de chauffage et son emplacement. D'autre part, si le nombre de Rayleigh est élevé, il affecte clairement sur la convection. L'augmentation de la forme géométrique de l'enceinte ou l'emplacement de la plaque chauffante a un effet direct sur les modèles de zone de circulation dans les deux régions (air/nanofluide).

**1.9 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 2 :**  
**Formulations**  
**mathématiques**

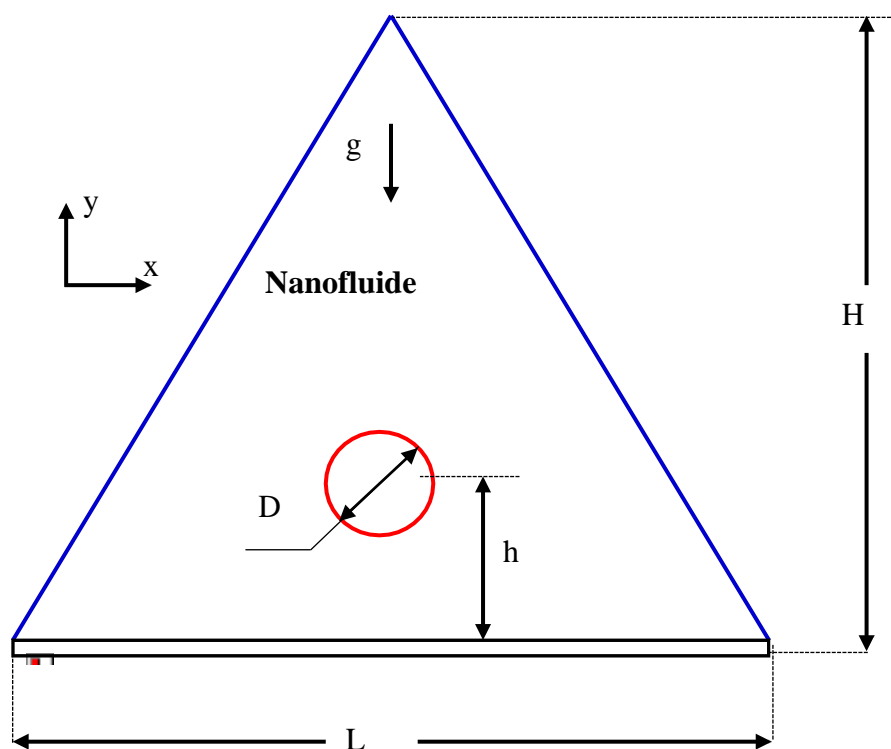


## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons les équations mathématiques, qui décrivent le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité fermée, de géométrie triangulaire. La formulation mathématique, des équations gouvernantes est basée sur l'équation de continuité, les équations de mouvement (décrites par les équations de Navier-Stokes dans le cas d'une cavité fermée et remplie de fluide), et l'équation de l'énergie. Le terme des forces de poussée dans l'équation d'énergie est exprimé par l'approche de Boussinesq. On donne dans ce chapitre aussi la formulation mathématique de l'écoulement du nanofluide eau +  $\text{TiO}_2$ , ainsi que les modèles utilisés pour le calcul de ses propriétés thermophysiques.

## 2.2 Description du problème

La figure 2.1 présente le problème considéré dans une cavité triangulaire. Les dimensions de la cavité sont sa longueur  $L$  et sa hauteur  $H$  tel que  $L=H$ . Les parois inclinées de la cavité sont isothermes froides  $T_F$ , alors que sa base est isolée thermiquement. D'autre part, la cavité est munie d'une source de chaleur cylindrique isotherme chaude  $T_C$  de diamètre  $D$ . Cette dernière est déplacée verticalement par la hauteur  $h$ . On utilise le nanofluide eau+  $\text{TiO}_2$  et la fraction volumique des nanoparticules est prise dans l'intervalle  $0 \leq \phi \leq 0,05$ . Le nombre de Rayleigh compris entre  $10^3$  et  $10^6$ .



**Figure 2.1** : Schéma du problème physique

Les propriétés thermo-physiques des nanofluides sont déterminées par les corrélations de **Khanafer et al.** [27]. Les propriétés physiques du fluide pur (eau) et celle de nanoparticule ( $\text{TiO}_2$ ) sont donnée dans le Tableau 1 à la température  $T = 25^\circ\text{C}$ .

	<b>Cp (J / kg. K)</b>	<b><math>\rho</math> (kg / m<sup>3</sup>)</b>	<b>K (W / m.K)</b>	<b><math>\beta</math> (1/ K)10<sup>-5</sup></b>
Eau	4179	997.1	0.613	21
TiO <sub>2</sub>	686,2	4250	8,9538	0,9

**Tableau 2.1:** Propriétés thermo-physiques du fluide pur et de nanoparticule

### 2.2.1 Hypothèses simplificatrices

Le processus de convection naturelle dans une cavité fermée est gouverné par un ensemble d'équations qui traduisent la conservation des différentes propriétés physicochimiques mises en jeu. La résolution des équations gouvernantes nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, on admet à cet effet :

- fluide newtonien et incompressible.
- écoulement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.
- régime d'écoulement laminaire et permanent.
- absence de source interne de chaleur, de source de masse ou de réaction chimique.
- le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

### 2.2.2 Approximation de Boussinesq

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  $\rho$  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  $\rho$  dans ce terme L'équation d'état pour la masse volumique  $\rho$  en utilisant le développement de Taylor devient :

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

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

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

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

## 2.3 Les paramètres thermophysiques des nanofluides

### 2.3.1 Masse volumique [28]

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Dans la littérature, et en l'absence de résultats expérimentaux, la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de la loi de mélange dans laquelle, comme pour la chaleur spécifique, le nanofluide est supposé homogène.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Viscosité dynamique [28]

D'une manière générale, les formules existantes dérivent du travail fondamental d'Einstein (1906). Basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité, Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi) \quad (2.4)$$

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions inter-particules.

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Chaleur spécifique [29]

La plupart des études effectuées dans la littérature utilise un des deux modèles définis par les équations II.6 et II.7 pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides. Le premier modèle est basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène, tandis que le modèle de l'équation II.7 est fondé sur l'hypothèse d'équilibre thermique entre les particules et le fluide de base.

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi \cdot Cp_{np} \quad (2.6)$$

$$Cp_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho \cdot Cp)_f + \phi(\rho \cdot Cp)_{np}}{(1 - \phi)\rho_f + \phi \cdot \rho_{np}} \quad (2.7)$$

### 2.3.4 Conductivité thermique [29]

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 nanofluides.

Maxwell fut (1881) le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f + 2\phi(K_p - K_f)}{K_p + 2K_f + \phi(K_p - K_f)} \quad (2.8)$$

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

## 2.4 Les équations 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

### 2.4.1 Equation de continuité

L'équation de conservation de la masse, aussi communément appelée équation de continuité (lorsque l'écoulement est permanent et le fluide est incompressible) s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.9)$$

### 2.4.2 Equation 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 suit :

Suivant x :

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2.10)$$

Suivant y :

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho_{nf} \cdot \beta_f \cdot g(T - T_0) \quad (2.11)$$

### 2.4.3 Equation de conservation de l'énergie

De la même manière que pour le bilan de quantité de mouvement, nous allons introduire l'équation de conservation d'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2.12)$$

### 2.5 Conditions aux limites

Notre étude est concernée le comportement de l'écoulement de nanofluide dans une cavité triangulaire bidimensionnelle. Elle est munie d'une source de chaleur cylindrique isotherme chaude, la paroi horizontale est adiabatique et les parois inclinées sont froides. Les conditions qui représentent ce phénomène sont :

Pour la source chaude  $U = V = 0; \theta = 1$

Pour les parois inclinées  $U = V = 0; \theta = 0$

Pour la paroi adiabatique :  $U = V = 0; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$

Où

$$X, Y = \frac{x, y}{H}; U, V = \frac{u, v}{\frac{\alpha_{nf}}{H}}; \theta = \frac{T - T_0}{T_C - T_F} \quad (2.13)$$

### 2.6 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt basé sur la hauteur (ou la largeur) du triangle est évalué à partir de la relation suivante :

$$Nu = \frac{h_{nf} \cdot D}{K_f} \quad (2.14)$$

Le coefficient de transfert de chaleur pour le nanofluide  $h_{nf}$  est obtenu à partir de

$$h_{nf} = \frac{\phi}{T_C - T_F} \quad (2.15)$$

### 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi 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.

# **Chapitre 3 :**

# **Simulations**

# **numériques**

### 3.1 Introduction

La simulation numérique des écoulements est maintenant considérée comme de véritables expériences numériques lorsque les simulations sont faites avec soin. L'avantage des méthodes numériques est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (surface libre, champ de vitesse, champ de pression, contraintes, ...) sont immédiatement obtenues. Dans une expérience l'obtention de ces quantités en tous les points du champ est souvent impossible ou très difficile à réaliser. La première partie de ce chapitre porte sur les démarches d'utilisation d'un code de calcul numérique de dynamique des fluides pour modéliser la convection naturelle dans des cavités. Nous présentons le logiciel de CFD choisi pour cette modélisation.

### 3.2 Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une Analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

#### 3.2.1 Maillage structure (QUADRA/HEXA)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.</li> <li>• Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe</li> <li>• Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes</li> </ul>

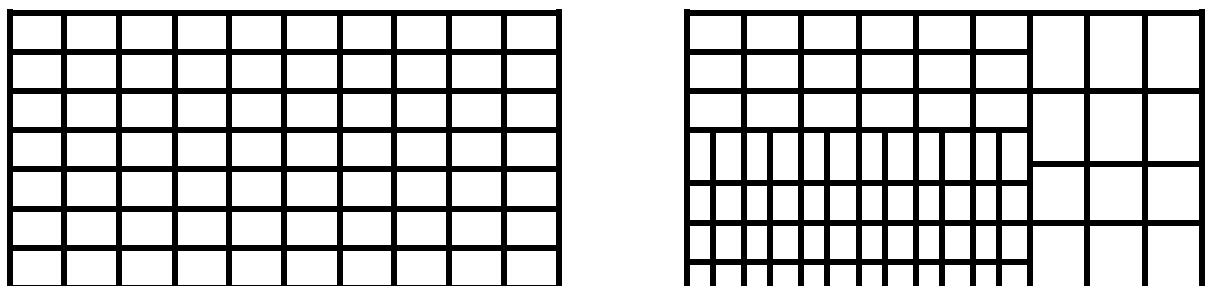


Figure 3.1 : Maillage structuré

### 3.2.2 Maillage non structure (TRI/TETRA.)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments</li> <li>• Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré</li> <li>• Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré</li> </ul>

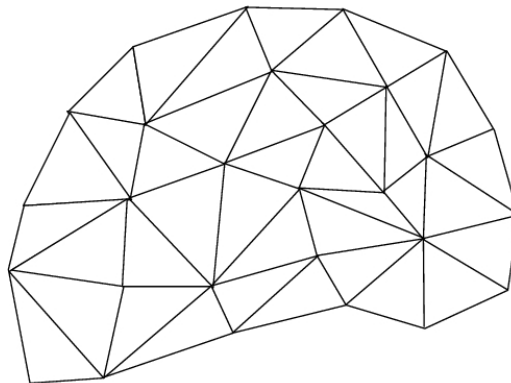


Figure 3.2 : Maillage non structuré

### 3.2.3 Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Les avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non Structuré.

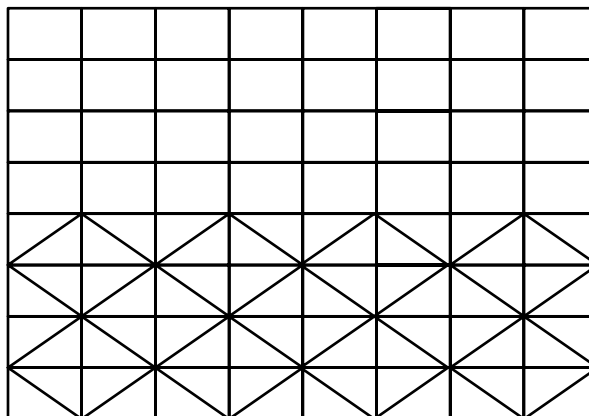


Figure 3.3 : Maillage hybride.



### 3.3 Structure du code Fluent

Il existe un certain nombre de codes commerciaux, avec des pré-processeur de maillage performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, STAR-CD, TRIO, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, N3S, CFDS-FLOW3D ...).

Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes qui simule tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "FLUENT" aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques.

Ce code est largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "FLUENT" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel de type CFD, de trois éléments clés qui sont : le pré - processeur, le Solveur et le post-processeur. Nous détaillons ci-dessous ces trois éléments.

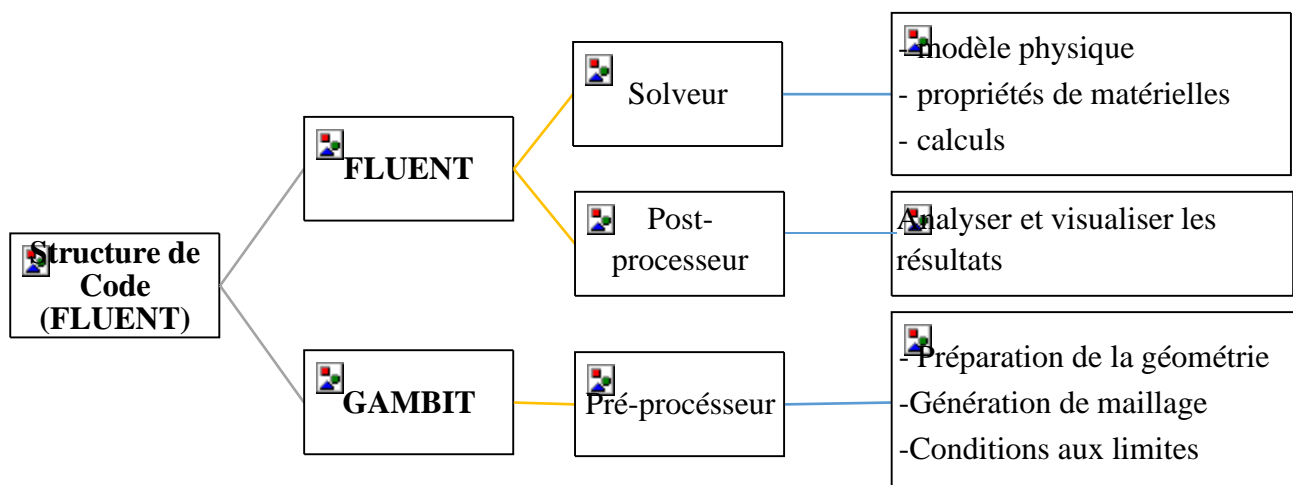


Figure 3.4 : schéma structure de code (FLUNET)

### 3.4 Simulation sous Fluent

Cette partie fournit une explication sur FLUENT, et de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le Solutionur. Il explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides. Une attention particulière est donnée aux écoulements internes.

### 3.4.1 Lancement de Fluent

Le FLUENT est un logiciel de simulation de tous les écoulements de fluides, compressibles ou incompressibles, Ce produit dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation.

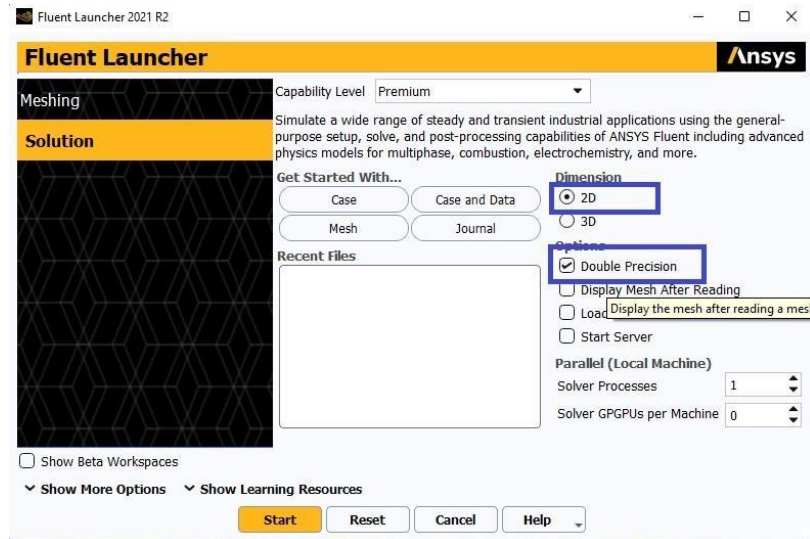


Figure 3.5 : Vue globale de Fluent

### 3.4.2 Importation de la géométrie (\*.msh)

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

**File → Read → Mesh.**

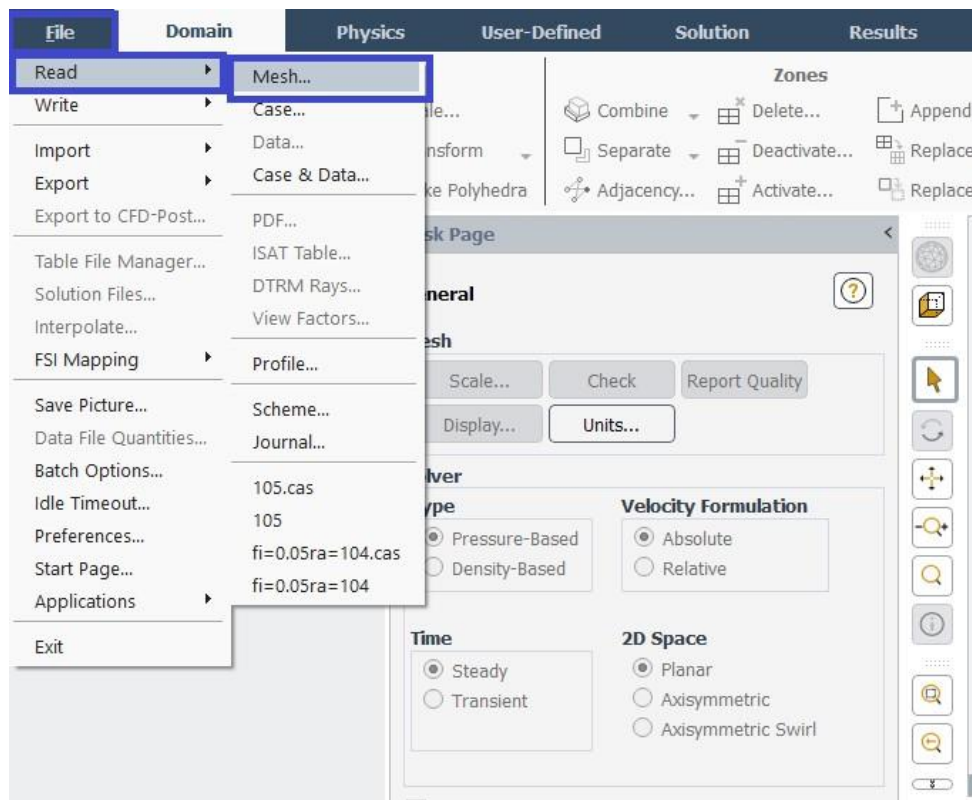


Figure 3.6 : Exportation du fichier mesh

### 3.4.3 Vérification du maillage importé

#### General → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs.

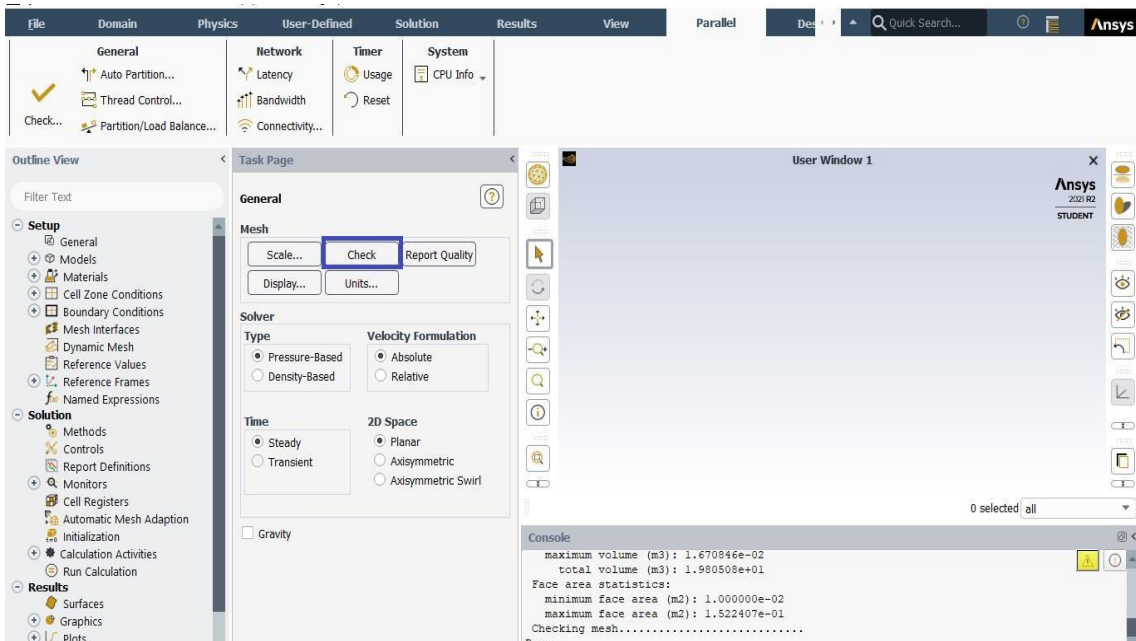


Figure 3.7 : Vérification du maillage sous Fluent

### 3.4.4 Vérification de l'échelle

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

#### General → Scale

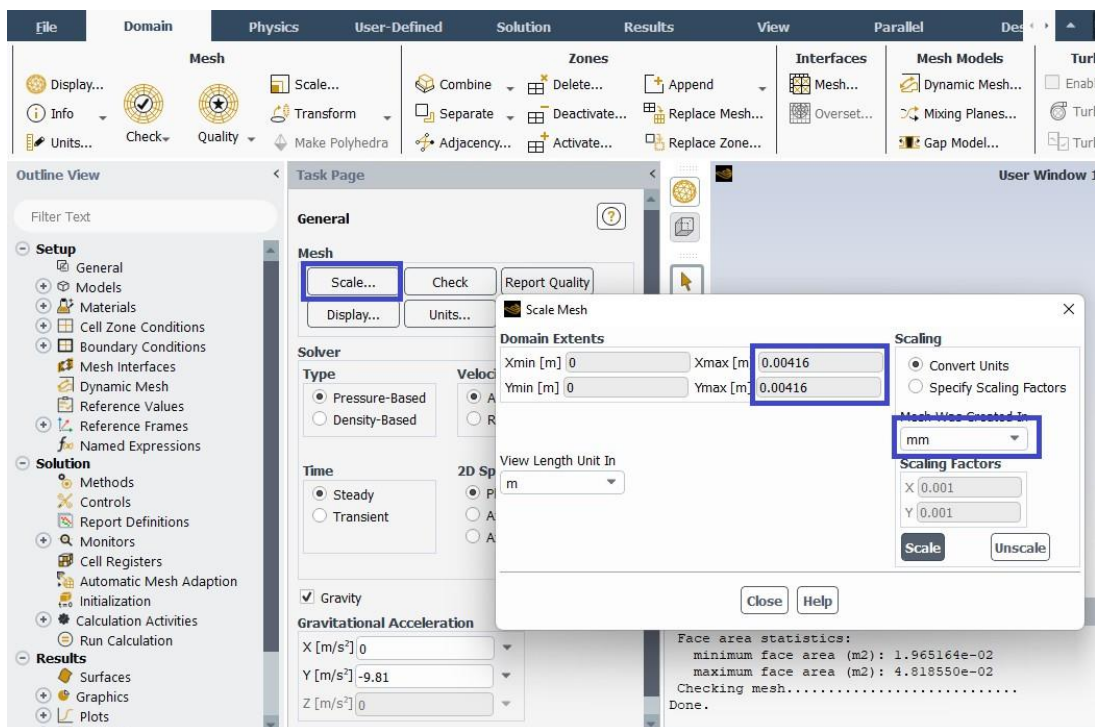


Figure 3.8: Vérification des unités

### 3.4.5 Choix du Solveur

Le second menu que l'on va utiliser est le menu **Setup**. La démarche à suivre est de partir des options du haut du menu secondaire et de descendre au fur et à mesure. Nous trouvons donc l'option du haut du menu secondaire et de des **General** qui se décompose aussi en un autre menu. **Solveur** permet de choisir le type Solveur que l'on souhaite utiliser (implicite, explicite, stationnaire, **2D...**).

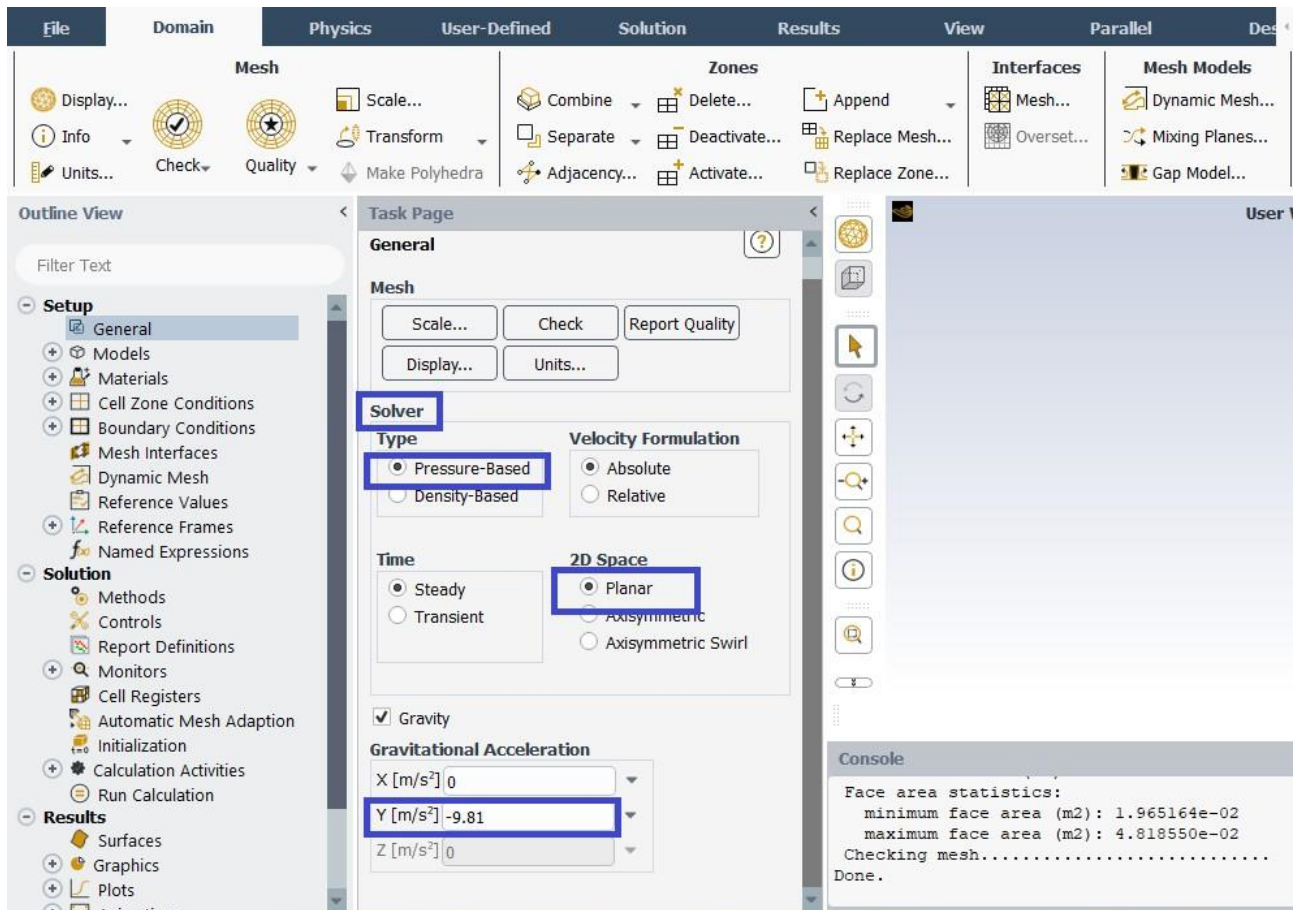


Figure 3.9 : Le choix de schéma de résolution

### 3.4.6 Équation de l'énergie

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique

**Setup** → **Models** → **Energy**

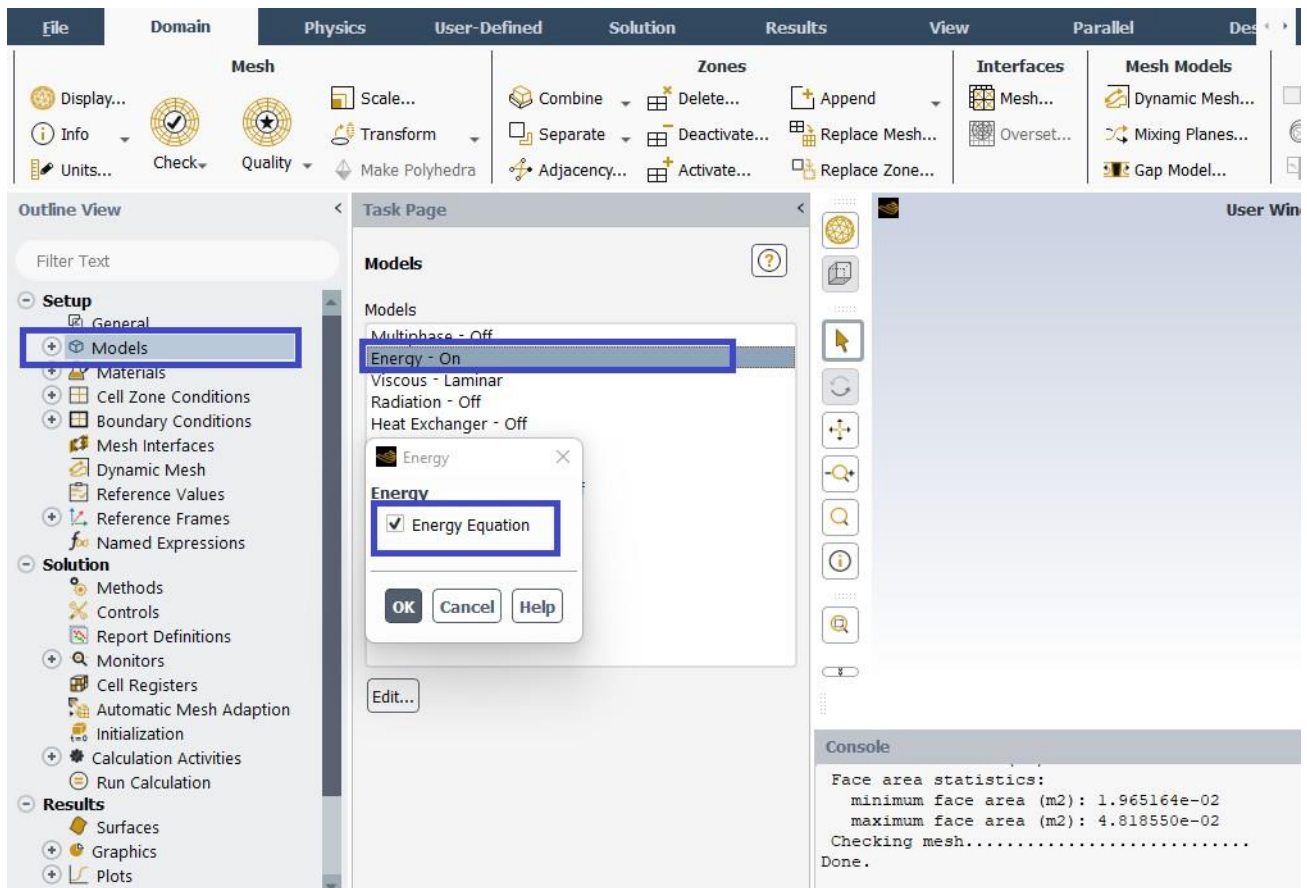


Figure 3.10 : Equation de l'énergie

### 3.4.7 Définition des caractéristiques du fluide

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque des données de Fluent.

#### Setup → Materials

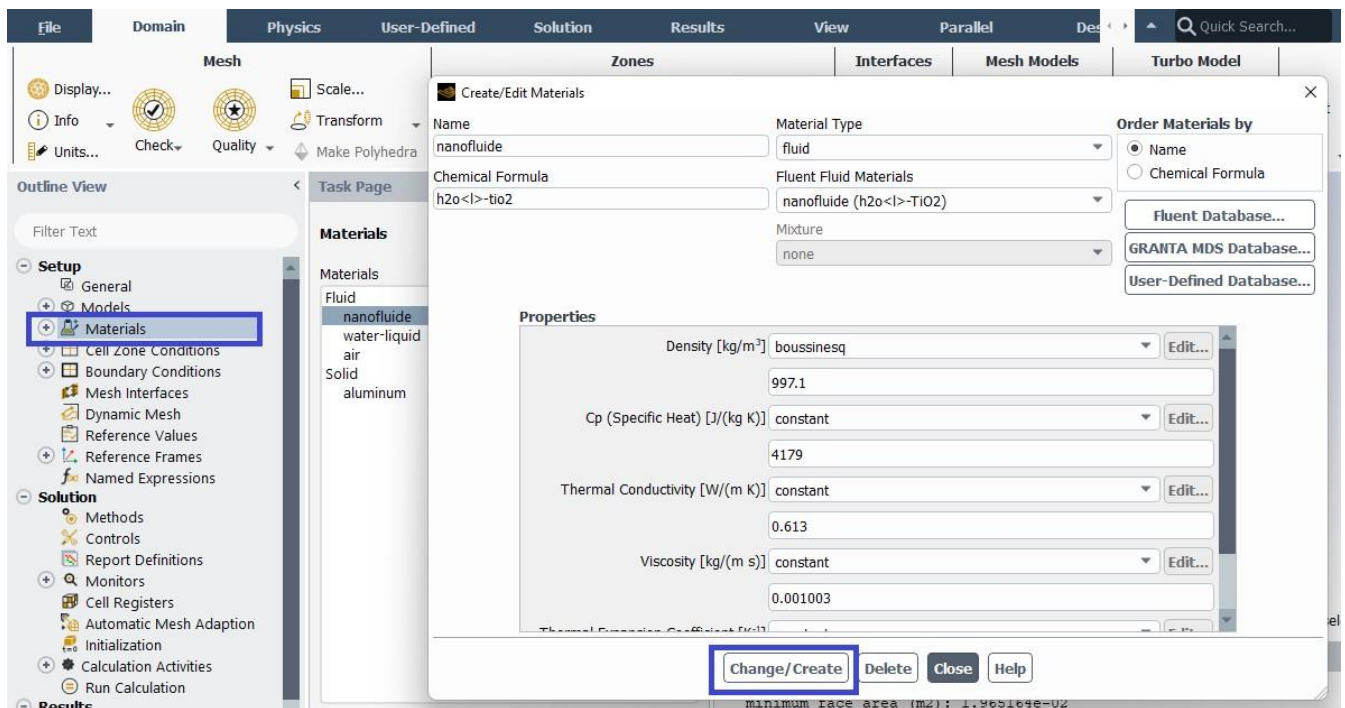


Figure 3.11 : Définition des caractéristiques du fluide

### 3.4.8 Conditions de la zone cellulaire

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord le fluide utilisé dans la simulation «cell zone conditions».

Setup → cell zone conditions → fluid

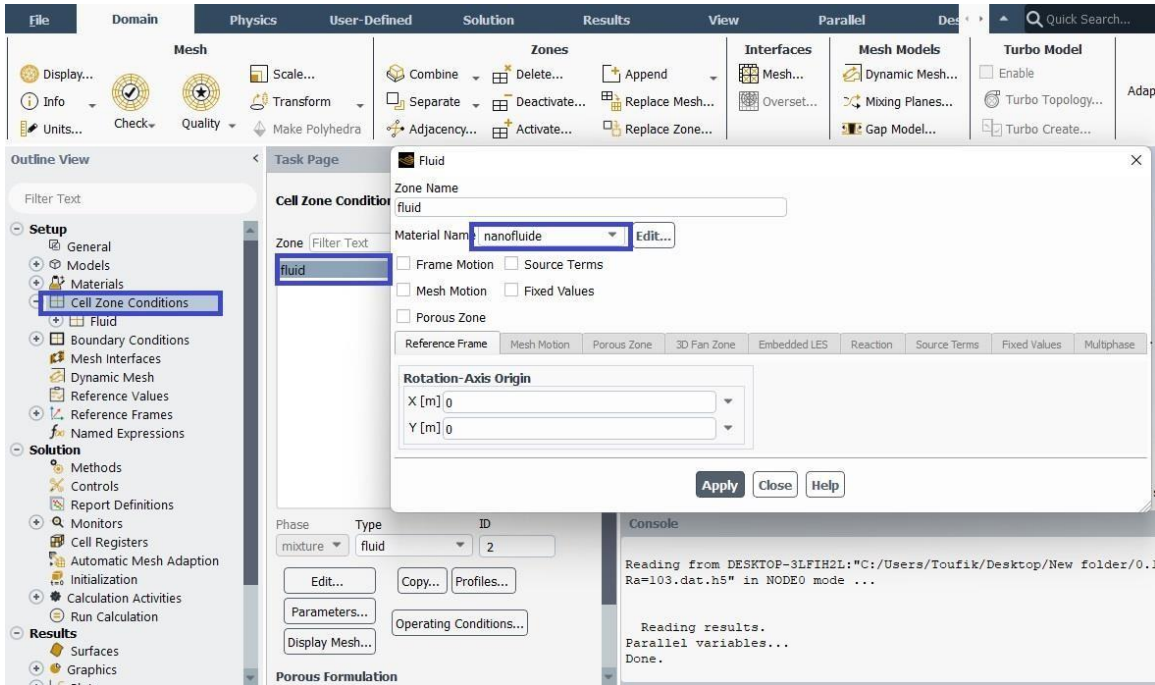


Figure 3.12 : Choix du fluide utilisé

### 3.4.9 Conditions aux limites usuelles

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites

Setup → Boundary Conditions

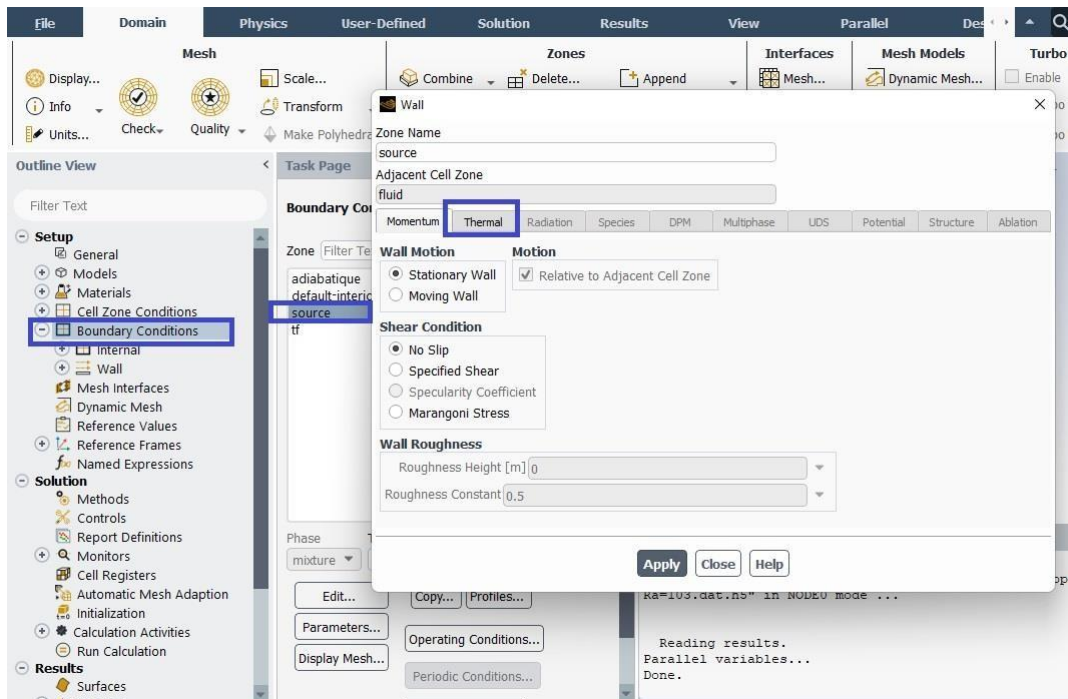


Figure 3.13 : les conditions aux limites

### 3.4.10 Méthode de solution

On va choisir la méthode de solution

**Solution** → **Methods**

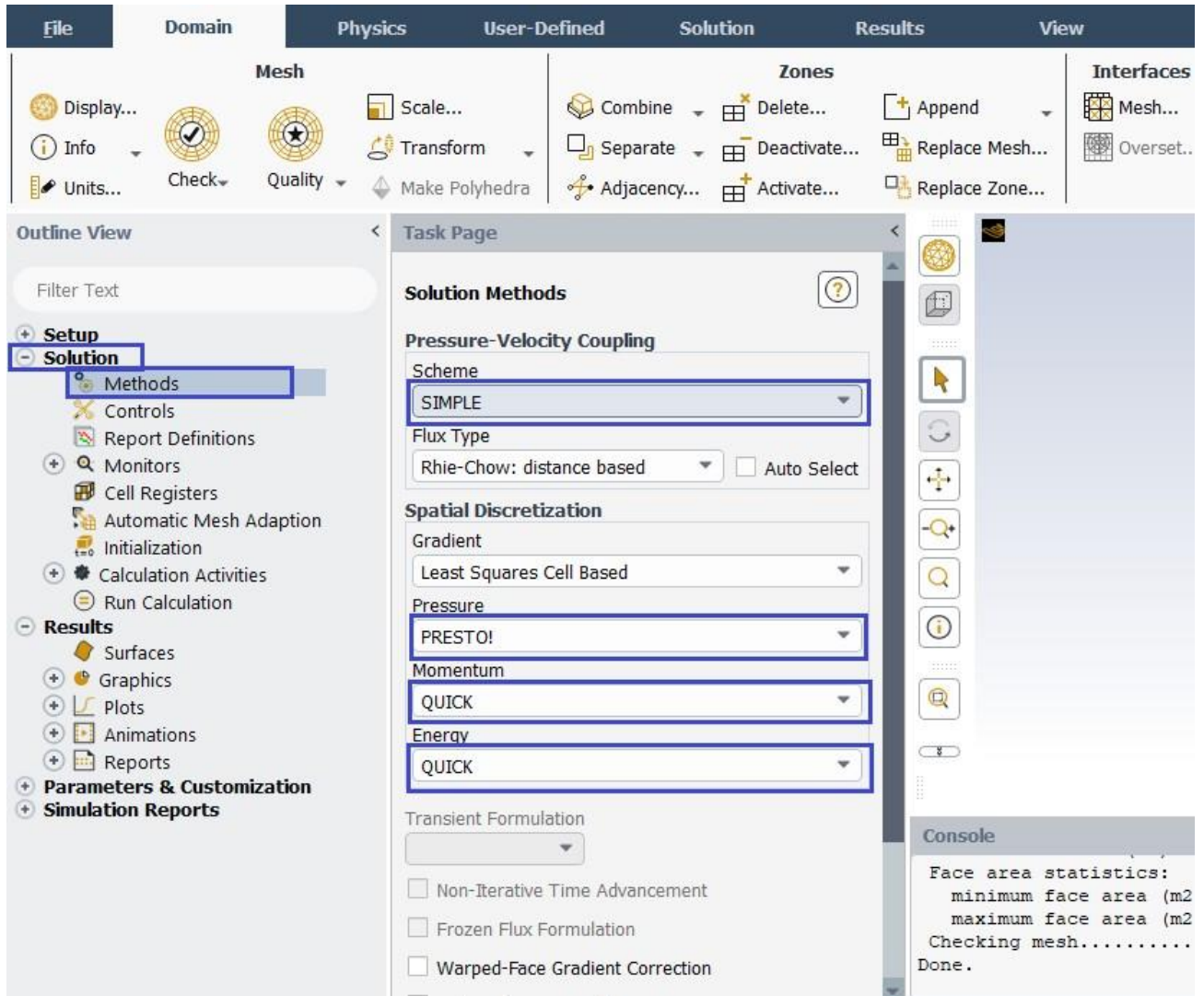


Figure 3.14 : la méthode solution

### 3.4.11 Initialisation du calcul

Initialiser le champ d'écoulement pour la valeur à l'entrée :

**Solution** → **Initialize** → **Initialize...**

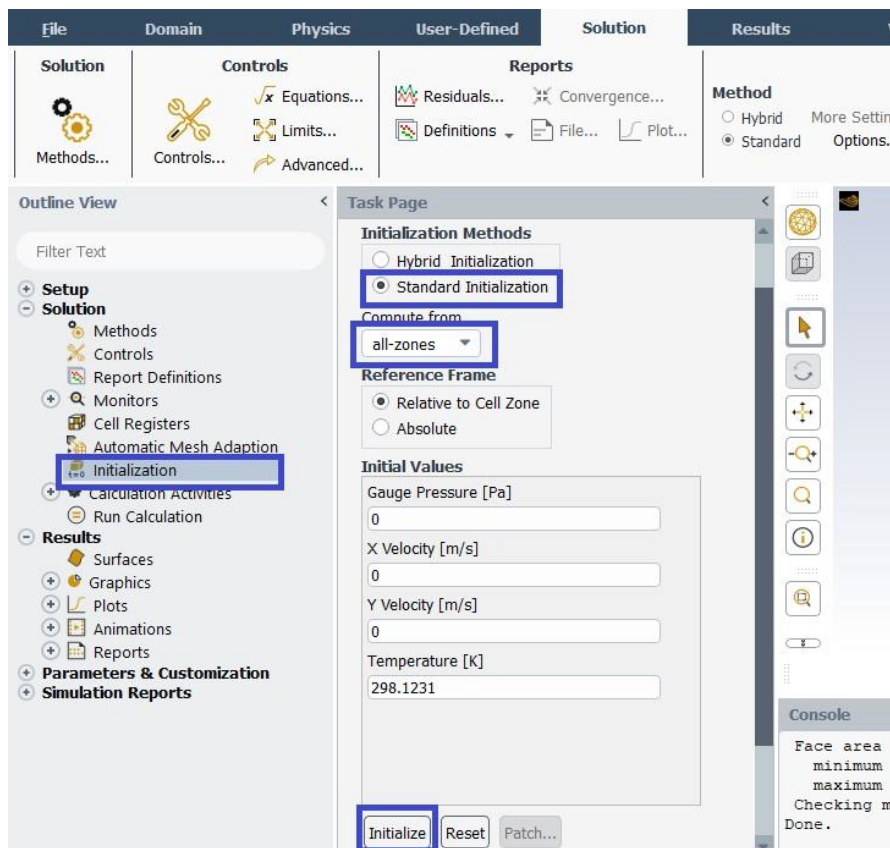


Figure 3.15: Initialisation de la solution.

### 3.4.12 Choix des critères de convergence

Il s’agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s’arrêtent.

**Solution** → **Monitors** → **Residual...**

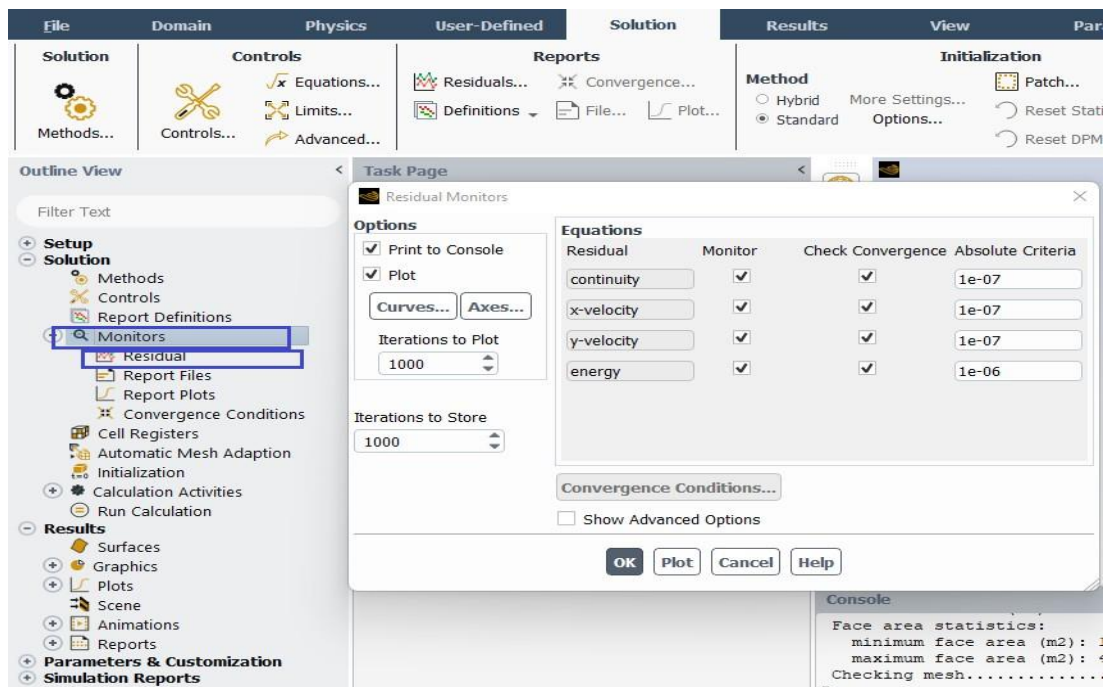


Figure 3.16 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence



Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

### 3.4.13 Lancement du calcul

Solution → Iterate...

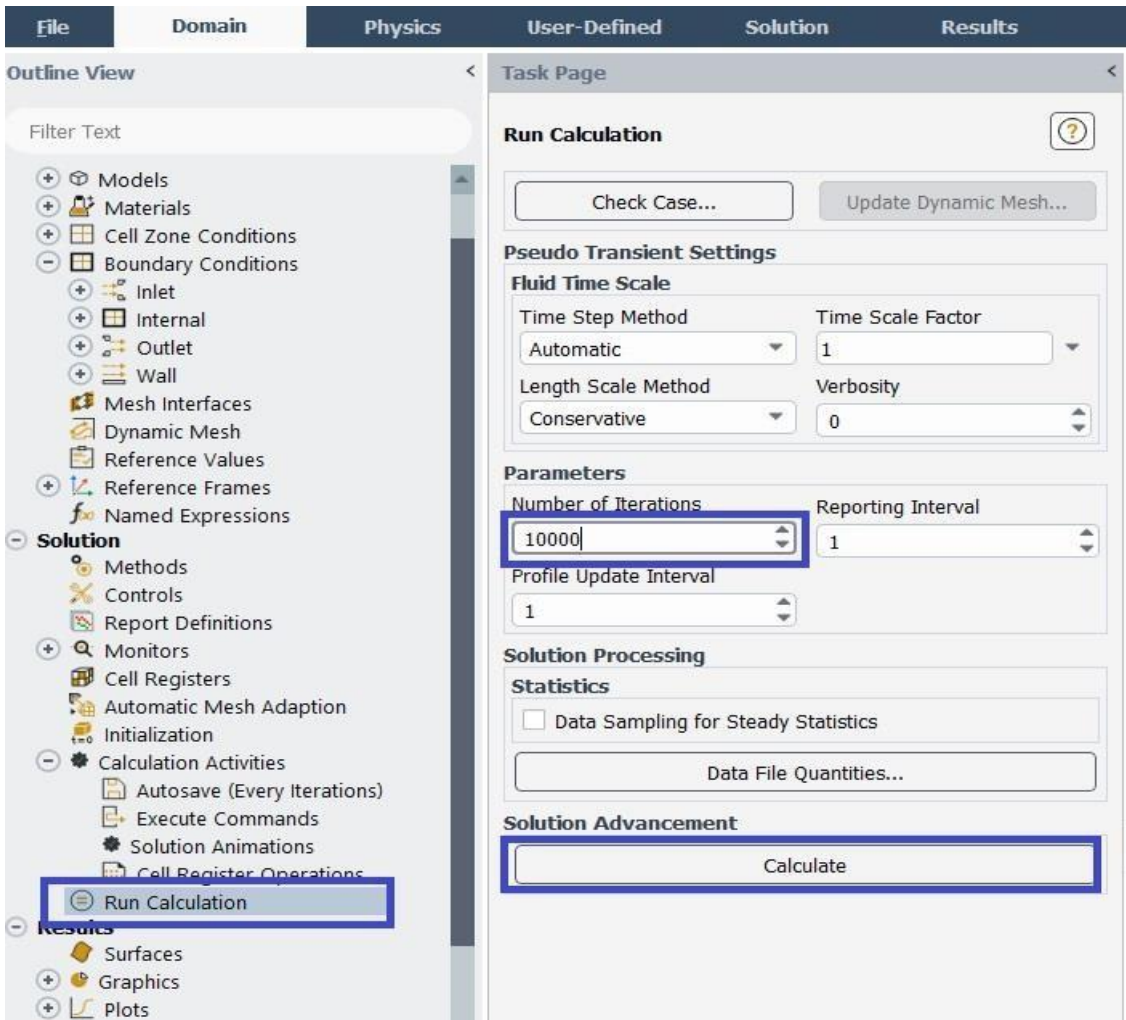


Figure III.16 : Choix du nombre des itérations

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité des opérations mathématiques et des méthodes numériques pour simuler l'interaction, et la présentation du code de calcul

Dans chapitre suivant, nous allons présenter les dernières étapes de notre processus FLUNET, à savoir le calcul numérique de la solution, la visualisation des résultats et la validation.

# **Chapitre 4 :**

# **Résultats et discussions**

## 4.1 Introduction

Ce chapitre est principalement consacré à la présentation et à l'analyse des résultats numériques de la convection naturelle dans un régime laminaire dans une cavité triangulaire à deux dimensions avec des nanofluides. La simulation numérique, est réalisée à l'aide du code de calcul Fluent version 21 student 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 Validation numérique

La simulation numérique a été effectuée avec le code commercial ANSYS Fluent. Pour la validation numérique du code de calcul, nous comparons les résultats numériques de cette étude avec ceux obtenus par **Ouyahia et al [22]**. Le tableau 4.1 présente la variation du nombre de Nusselt moyen obtenu au niveau de la paroi chaude pour le nanofluide  $\text{TiO}_2$  -eau et pour une fraction volumique des nanoparticules  $\phi = 0.1$  et pour les deux nombres de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^6$ . On peut voir que les résultats numériques obtenus et que ceux de [22] sont pratiquement égaux.

Ra	Ouyahia et al [22]	Présente étude
$10^3$	1.267	1.258
$10^6$	2.211	2.224

**Tableau 4.1** : Comparaison des valeurs moyennes du nombre de Nusselt  $Nu_{\text{moy}}$  de la cavité du code commercial Fluent avec celles de la littérature **Ouyahia et al [22]**

## 4.3 Maillage du domaine

Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, de lignes isothermes et de variation du nombre de Nusselt à paroi chaude. Le maillage est non structuré (121X121), il donne des valeurs plus précises en comparaison avec d'autres tailles de maillage. Les résultats obtenus pour nanofluide eau+  $\text{TiO}_2$ ,  $Ra = 10^6$ ,  $\phi = 0.01$  et  $h = 0,5H$ , avec ce maillage (121X121) sont comparables à ceux obtenus pour le maillage de (61X61), (81X81) et (101X101). La finesse du maillage (61x61) génère des variations maximales inférieures à 0,65% en termes de  $Nu_{\text{moy}}$  (tableau 4.2), on voit clairement qu'il existe une petite différence entre les résultats des quatre maillages. On utilise cette finesse pour tous les calculs subséquents.

Maillage	(61X61)	(81X81)	(101X101)	(121X121)	Erreur % (abs)		
					(61X61)	(81X81)	(101X101)
Nu <sub>moy</sub>	2,614	2,605	2,600	2,597	0,65	0,31	0.10

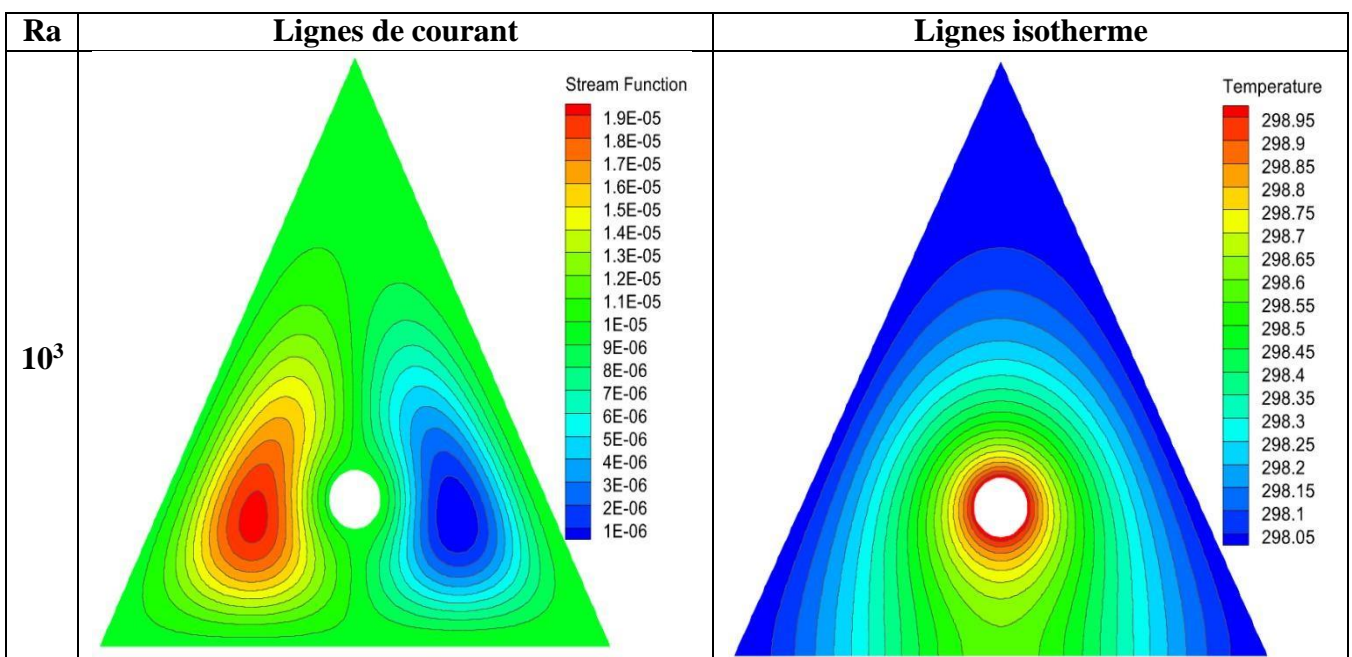
**Tableau 4.2 :** Effet de maillage sur les résultats obtenus pour nanofluide eau+ TiO<sub>2</sub>, Ra = 10<sup>6</sup>,  $\phi = 0.01$ , h = 0,5H et pour diamètre de la source D = 0,1 L

### 4.4 Résultats et discussions

Les paramètres physiques intervenant dans le problème considéré sont le nombre de Rayleigh Ra, la concentration volumique, les conditions géométriques et la position de la source de chaleur. Dans ce qui suit, les effets du nombre de Rayleigh Ra et la concentration volumique  $\phi$ , sur l'écoulement de fluide et des caractéristiques de transfert de chaleur sont présentés. Les résultats numériques ont été effectués pour le nanofluide eau-TiO<sub>2</sub> avec le régime est laminaire.

#### 4.4.1 Les contours de vitesse et les lignes isothermes

La figure 4.1 illustre les lignes de courant et les lignes isothermes pour une concentration volumique de nanofluide  $\phi=0,01$  et pour une source de chaleur du diamètre D = 0,1 L positionné à la hauteur de h = 0,25H. On remarque que l'augmentation du nombre de Rayleigh Ra entraîne des cellules de recirculations plus fortes et s'élève vers le haut, cela démontre qu'augmenter le nombre de Rayleigh Ra stimule les molécules de fluide (nanofluide) pour augmenter la vitesse de circulation dans la cavité. Pour l'allure des lignes isothermes, on remarque que la distribution de chaleur fournie par la source est meilleure lorsque la vitesse de circulation dans la cavité est augmentée. On remarque que pour améliorer le transfert thermique, il faut augmenter le nombre Ra.



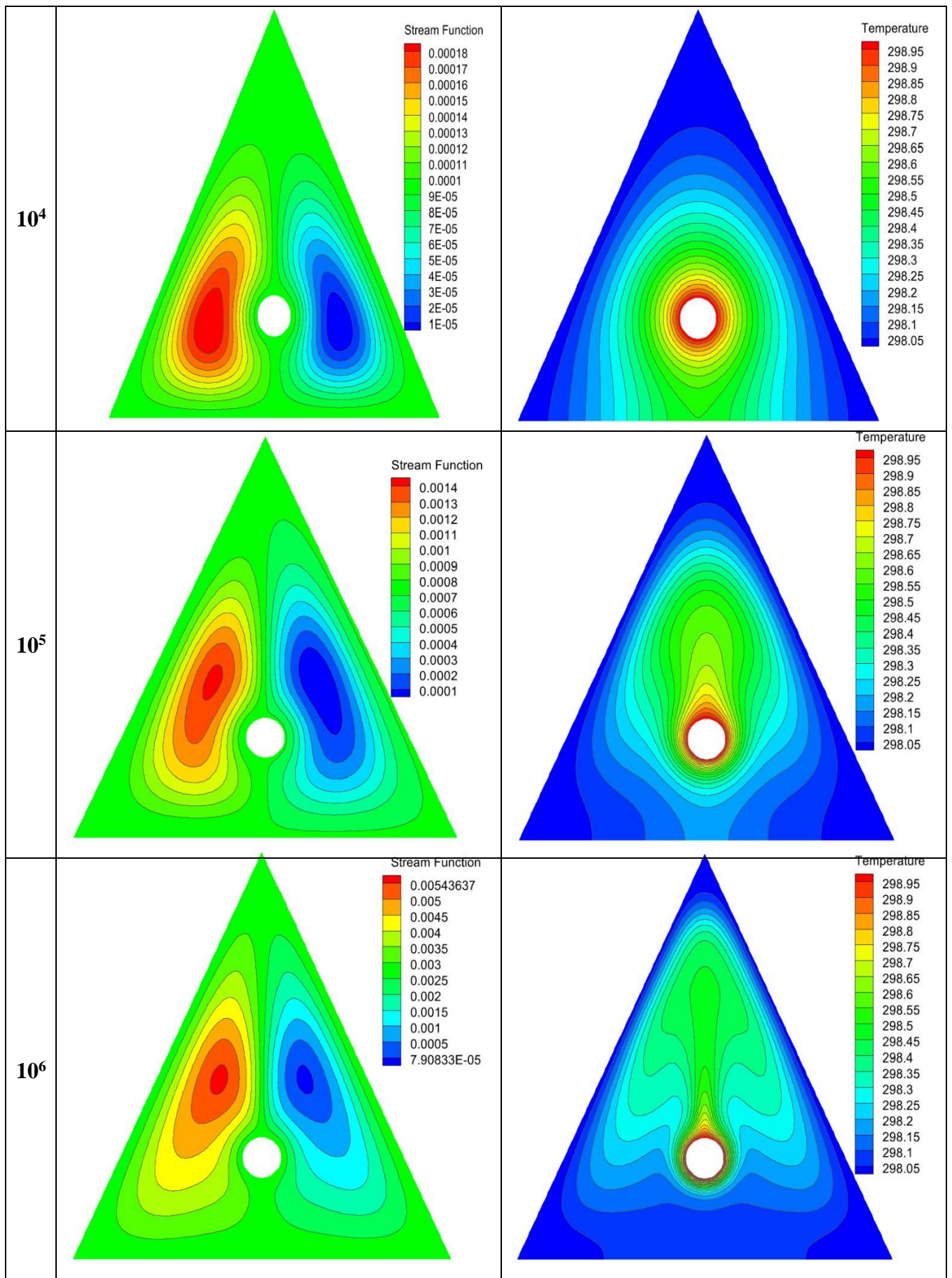
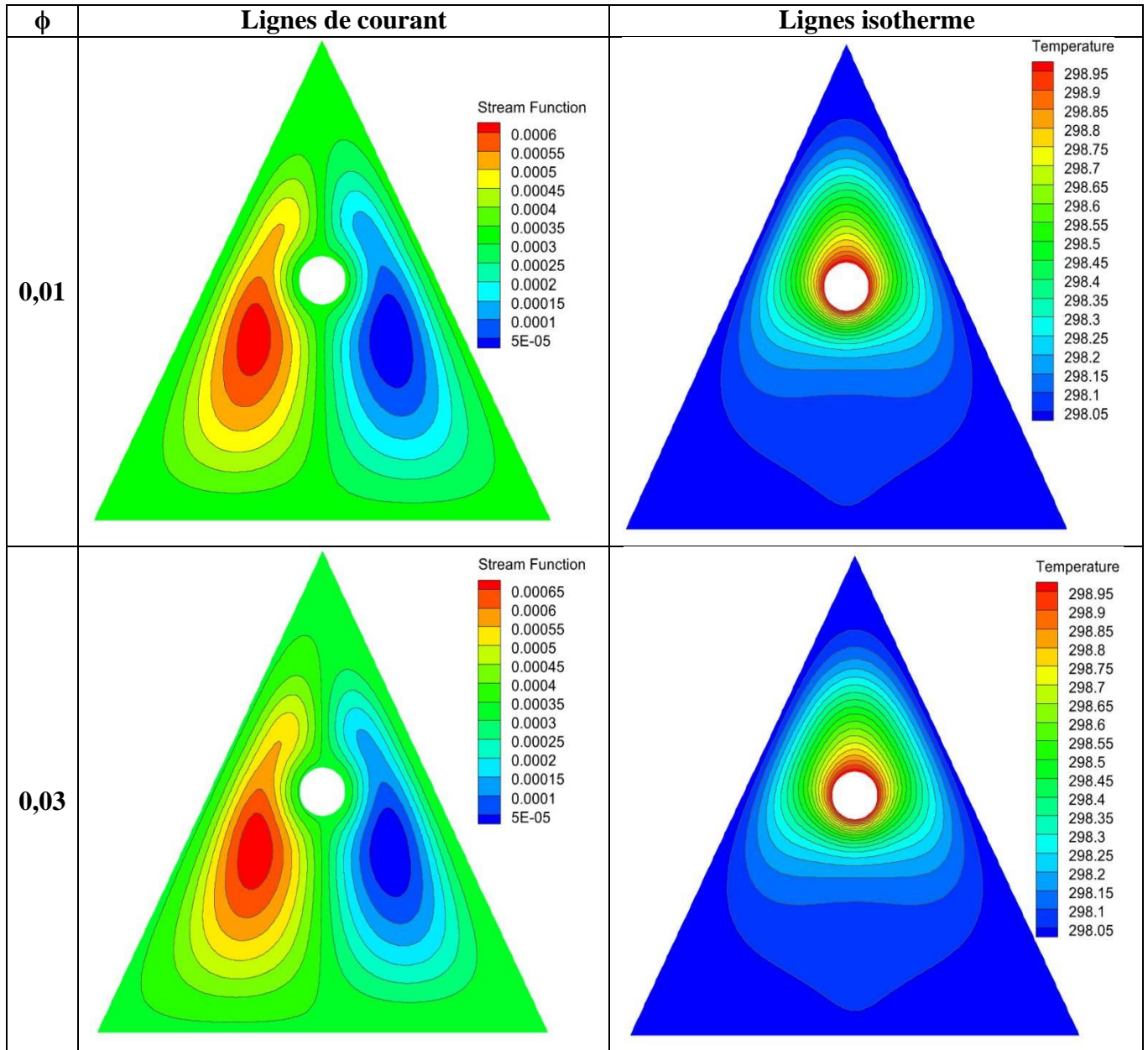
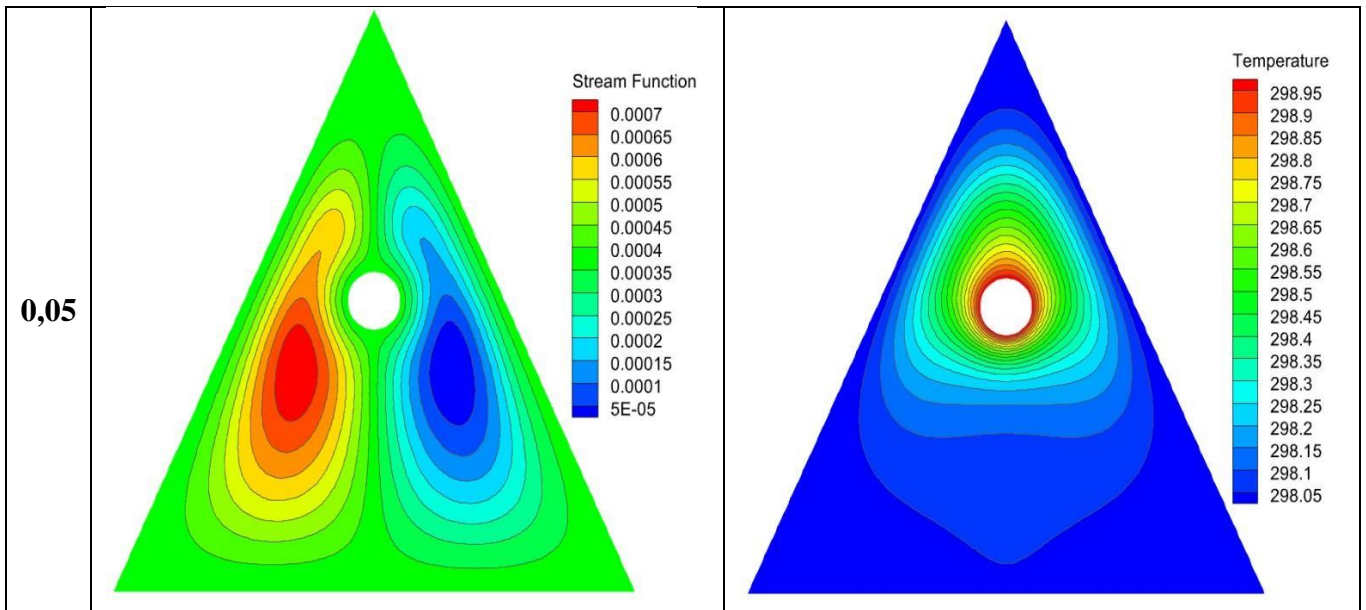


Figure 4.1 : L'influence du nombre de Rayleigh  $Ra$  sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour  $h = 0,25H$  et  $\phi = 0,01$

La figure 4.2 illustre les lignes de courant et les lignes isothermes pour le nombre de Rayleigh  $Ra = 10^5$  et pour une source de chaleur du diamètre  $D = 0,1L$  positionné à la hauteur de  $h = 0,5H$ . On remarque que l'augmentation de la concentration volumique de nanofluide  $\phi$  stimule les molécules de nanofluide pour augmenter la vitesse de circulation dans la cavité. Pour les lignes isothermes, on remarque que presque même allure pour les trois valeurs proposées. On constate que pour améliorer le transfert thermique, il faut augmenter la concentration volumique  $\phi$ .

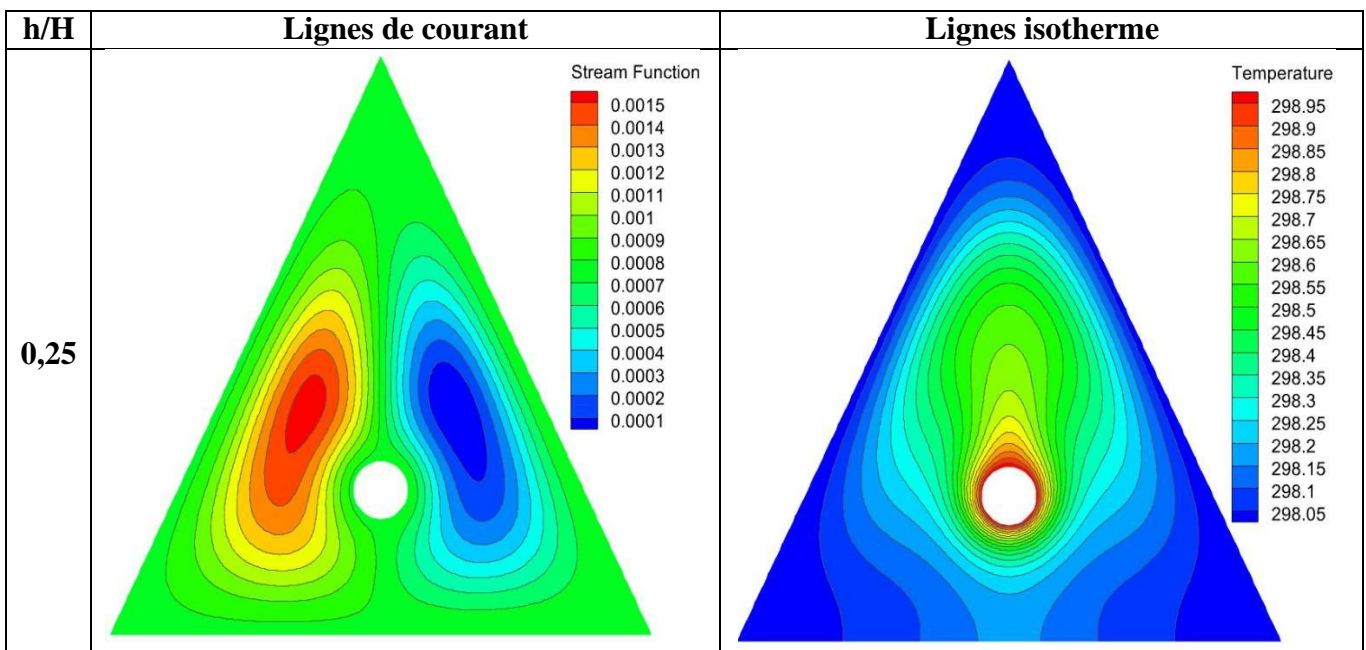


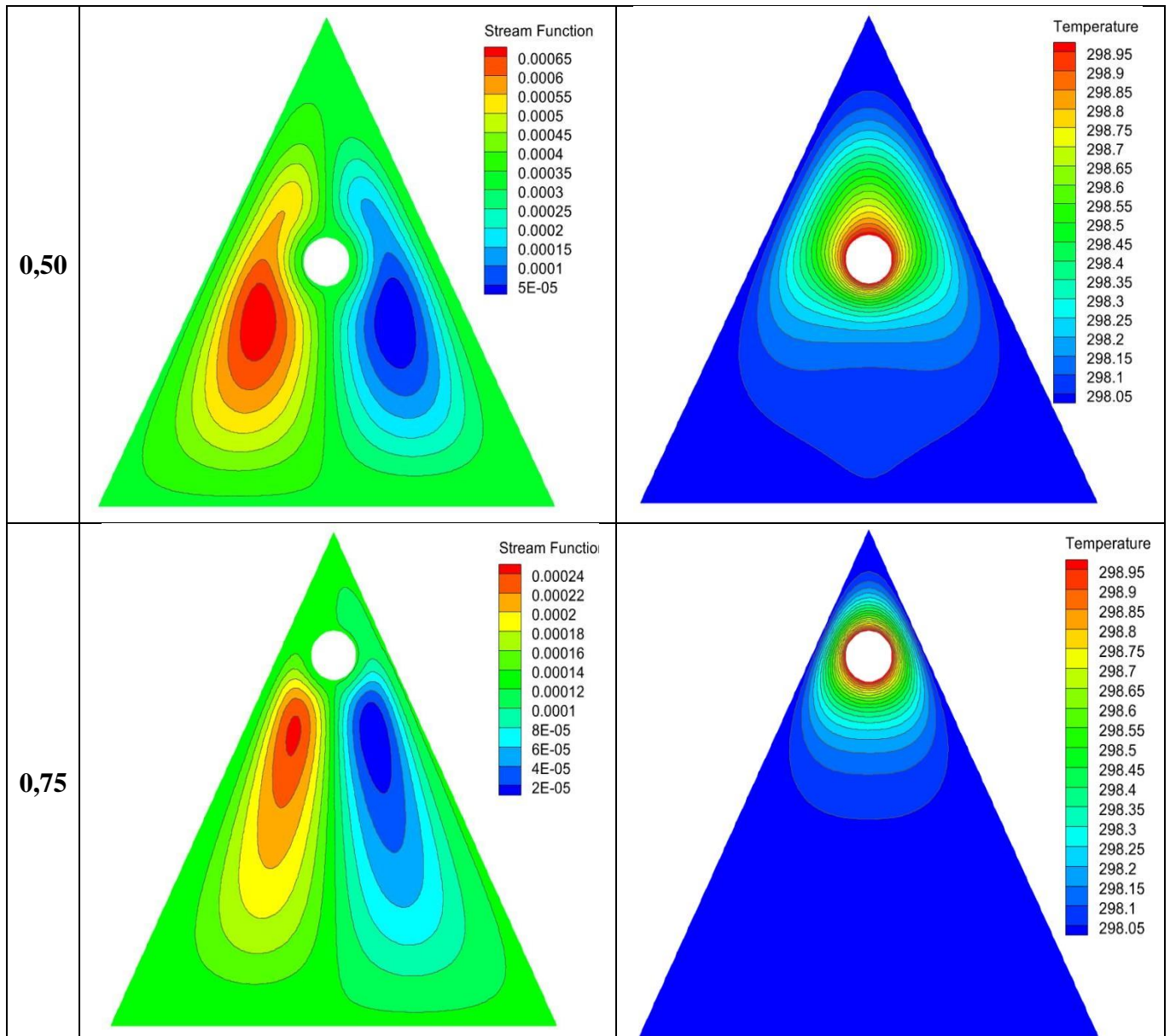


**Figure 4.2 :** L'influence de la concentration volumique  $\phi$  sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour  $Ra = 10^5$  et  $h = 0,5H$

L'influence de la position de la source  $h$  sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour le nombre de Rayleigh  $Ra = 10^5$  et pour une concentration volumique de nanofluide  $\phi = 0,03$  est illustré sur la figure 4.3. On remarque que lorsque la source de chaleur s'éloigne aux parois froides, la vitesse de circulation dans la cavité augmente.

Pour l'allure des lignes isothermes, on remarque que la distribution de chaleur fournie par la source est meilleure lorsque la source de chaleur s'éloigne aux parois froides. On constate que pour améliorer le transfert thermique, il faut éloigner la source aux parois.





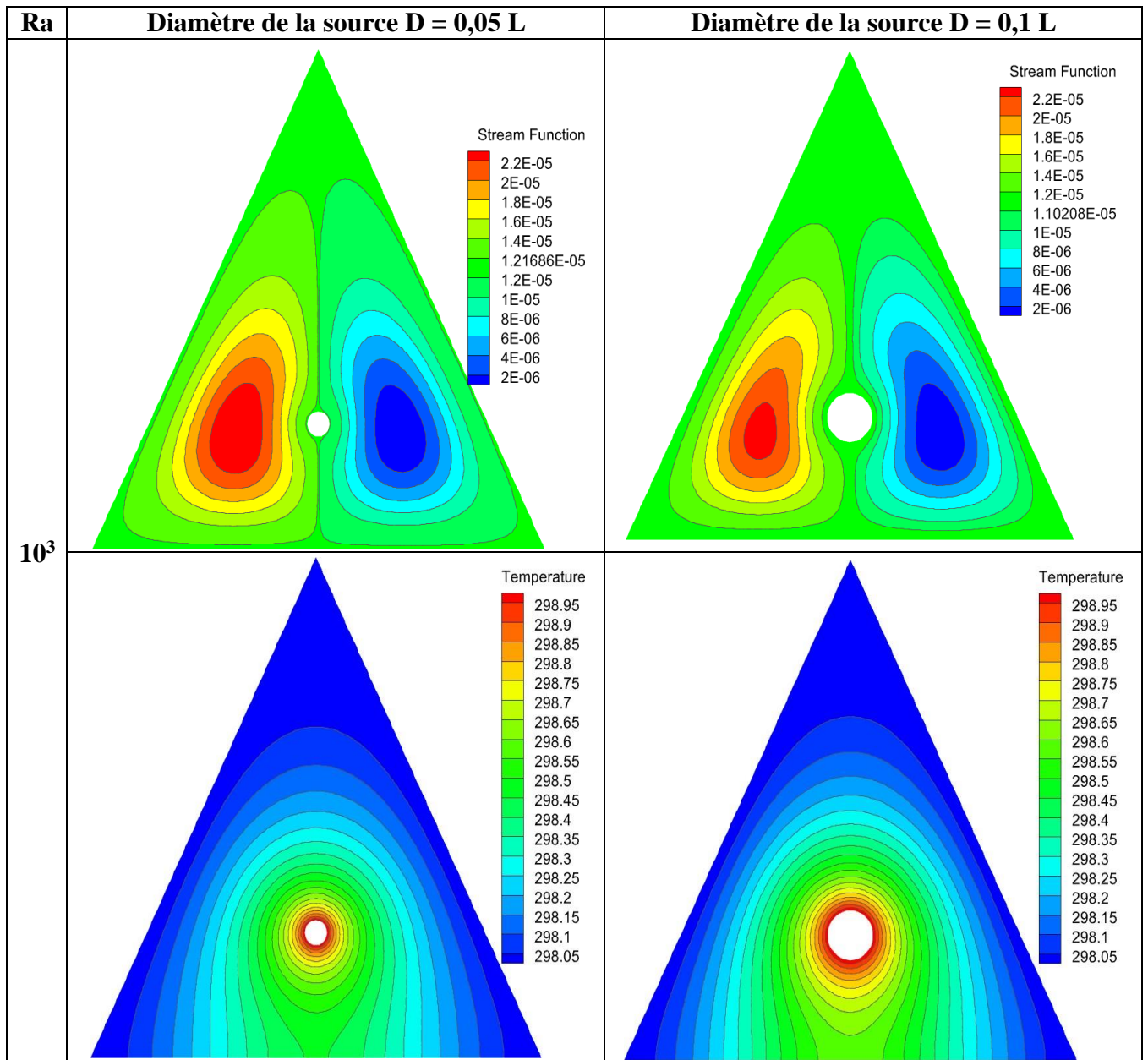
**Figure 4.3 :** L'influence de la position de la source  $h$  sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour  $Ra = 10^5$  et  $\phi = 0,03$

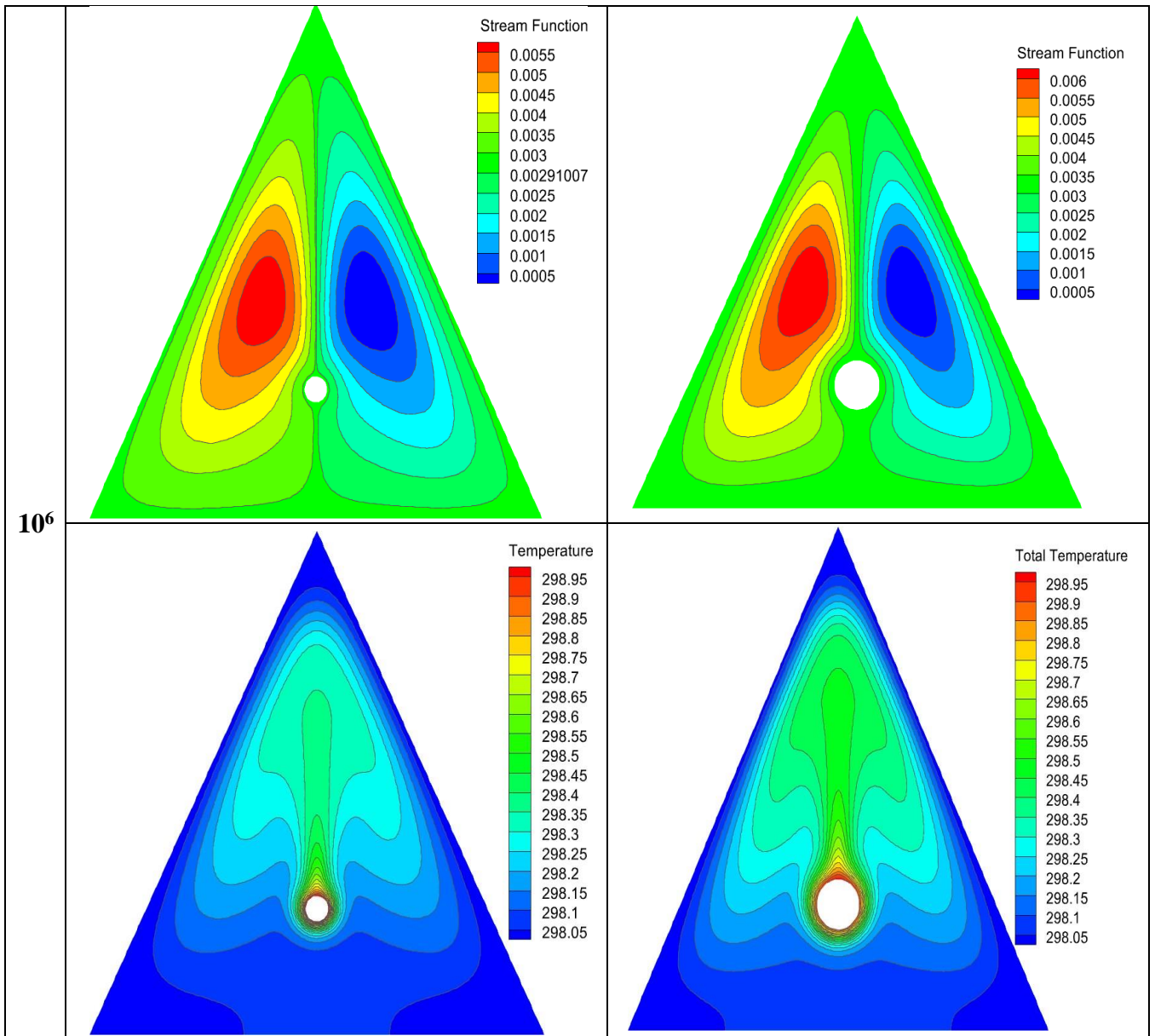
L'influence de la taille de la source sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour la concentration volumique de nanofluide  $\phi = 0,05$  et pour une source positionnée à la hauteur de  $h = 0,25H$  est illustré sur la figure 4.4.

On remarque que pour le nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$ , la vitesse de recirculation pour les deux tailles sont identique, par contre, pour  $Ra = 10^6$  la vitesse de recirculation plus élevée pour la taille de la source cylindre  $D = 0,1 L$  par rapport la taille de la source  $D = 0,05 L$ .

Pour l'allure des lignes isothermes, on remarque que la distribution de chaleur fournie par source pour les deux cas est presque identique.





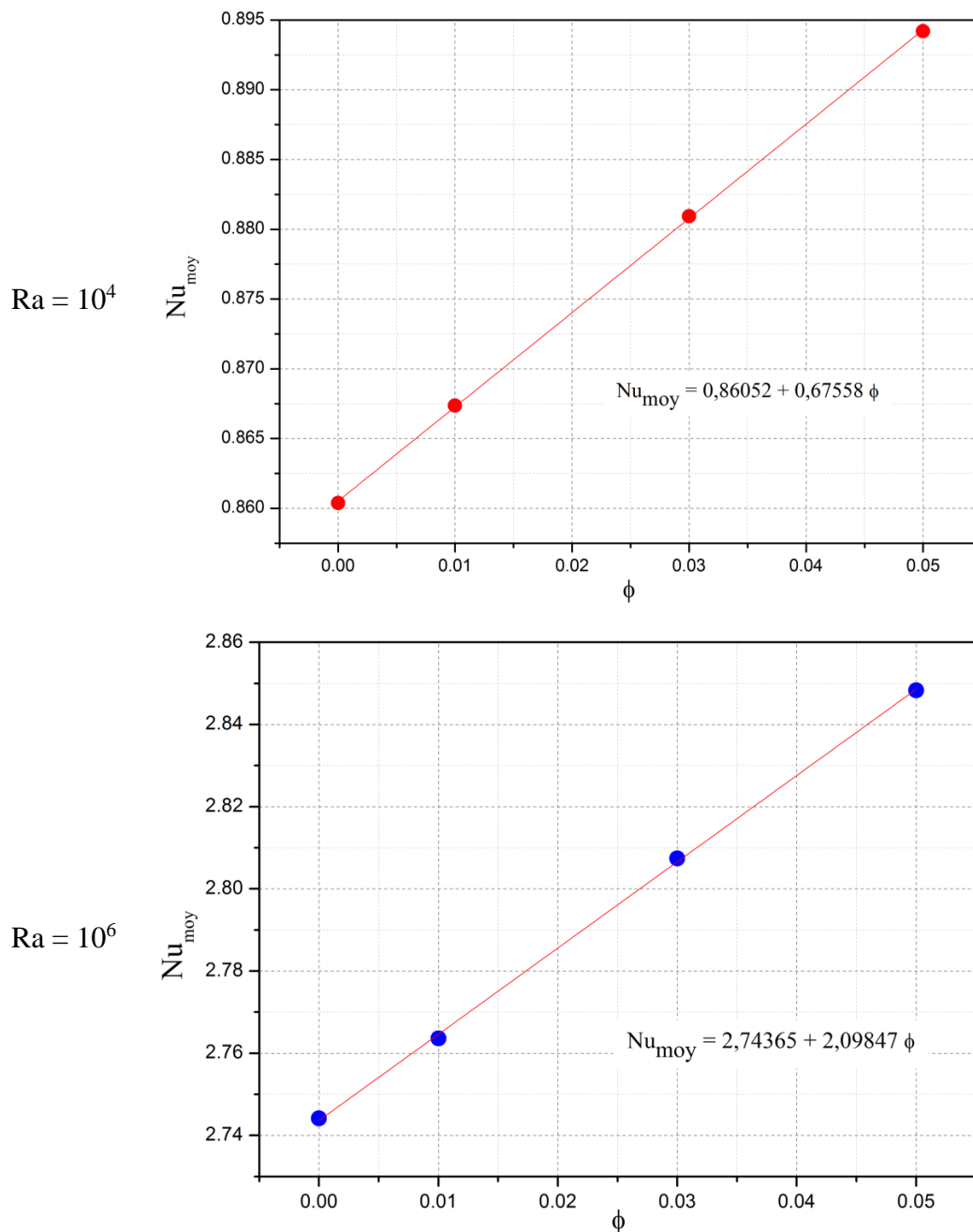


**Figure 4.4 :** L’influence de la taille de la source sur les lignes de courant et les lignes isothermes pour  $\phi = 0,05$  et  $h = 0,25H$

**4.4.2 Variation du nombre de Nusselt moyen**

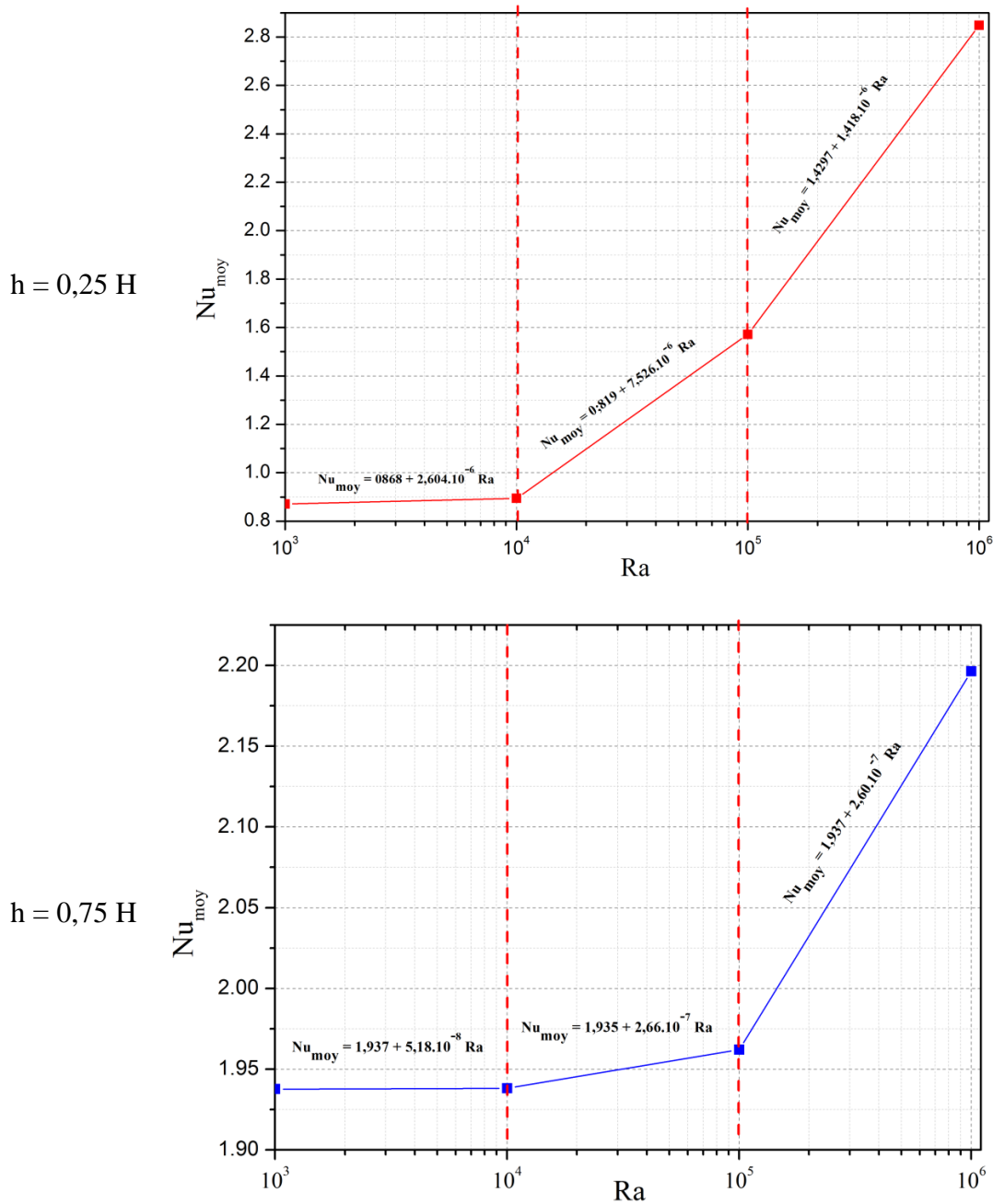
L’objectif de cette étude est de voir l’effet de la concentration volumique de nanofluide  $\phi$ , de la position de la source de chaleur  $h$ , et du nombre de Rayleigh  $Ra$  sur l’amélioration de transfert de chaleur convectif. La figure 4.5 représente l’effet de la concentration volumique de nanofluide sur le nombre de Nusselt moyen et pour les différentes valeurs du nombre de Rayleigh  $Ra$

L’effet de la concentration volumique de nanofluide  $\phi$  est proportionnel au nombre de Nusselt moyen, où lorsque la concentration volumique augmente le nombre de Nusselt moyen augment.



**Figure 4.5:** L'effet de la concentration volumique de nanofluide sur le nombre de Nusselt moyen pour  $h = 0,25H$  et diamètre de la source  $D = 0,1L$

La variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh  $Ra$  pour  $\phi = 0,05$  et les deux positions de la source  $h = 0,25H$  et  $h = 0,75H$  sont représentées dans la figure 4.6. On remarque que l'effet du nombre de Rayleigh  $Ra$  sur le nombre de Nusselt moyen est négligeable, tant que  $Ra < 10^4$ , assistant dans ce cas à un transfert thermique en mode de conduction. Pour des valeurs du nombre de Rayleigh supérieures à  $10^4$ , un transfert thermique en mode de convection prend alors le relai, entraînant une augmentation notable du nombre de Nusselt.

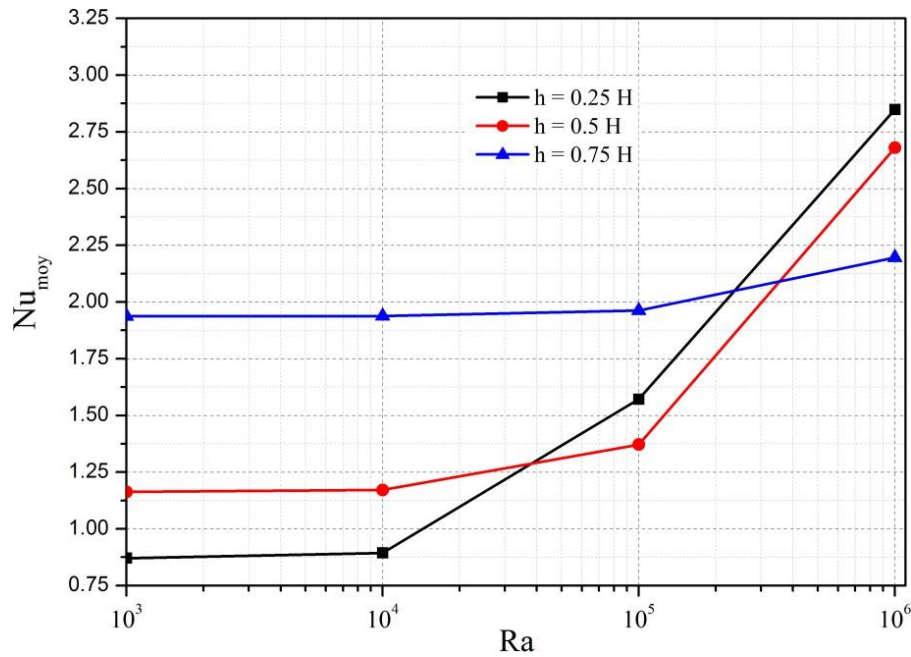


**Figure 4.6:** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh Ra pour  $\phi = 0,05$  et diamètre de la source  $D = 0,1 L$

Concernant l'effet de la position de la source sur le nombre de Nusselt moyen est illustré dans la figure 4.7, on peut diviser en deux parties :

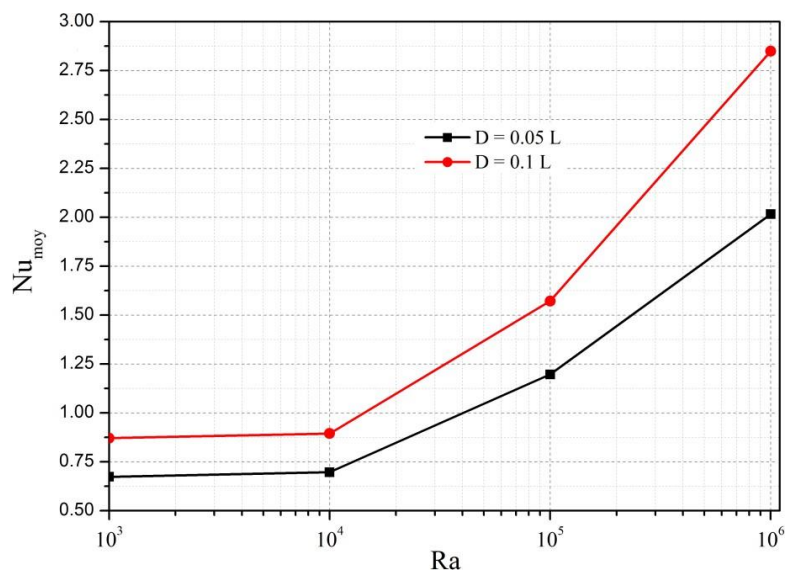
- Si le nombre de Rayleigh inférieur à  $10^4$ , Plus se rapproche de la source aux parois froides le nombre de Nusselt moyen augment. Ceci valide que, le transfert de chaleur assistant pour  $Ra < 10^4$  en mode de conduction

- Si le nombre de Rayleigh supérieur à  $10^4$ , Plus s'éloigné de la source aux parois froides le nombre de Nusselt moyen augment. Ceci valide que, le transfert de chaleur assistant pour  $Ra > 10^4$  en mode de convection



**Figure 4.7:** L'effet de la position de la source sur le nombre de Nusselt moyen pour  $\phi = 0,05$  et diamètre de la source  $D = 0,1L$

La figure 4.8 montre l'effet de la taille de la source positionné à la hauteur de  $h = 0,25H$  sur le nombre de Nusselt moyen et pour la concentration volumique de nanofluide  $\phi = 0,05$ . On remarque que pour améliorer le transfert thermique il faut augmenter du diamètre de la source



**Figure 4.8:** L'effet de la taille de la source sur le nombre de Nusselt moyen et pour  $\phi = 0,05$

#### 4.5 Conclusion

Dans ce travail, on a effectué une simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité triangulaire soumise aux conditions aux limites thermiques et cinématiques. Pour voir l'influence du nombre de Rayleigh  $Ra$ , la concentration volumique de nanofluide  $\phi$  et la position de la source de chaleur sur le champ d'écoulement et le transfert de chaleur, la simulation numérique a été réalisée pour différentes valeurs de ces trois paramètres.

Les résultats montrent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh  $Ra$ , le diamètre de la source  $D$  et de la concentration volumique de nanofluide  $\phi$ , ainsi que le transfert de chaleur prend le mode de la conduction pour le nombre de Rayleigh  $Ra$  inférieur à  $10^4$  et le mode de la convection pour le nombre de Rayleigh  $Ra$  supérieur à  $10^4$ . D'autre part, le transfert de chaleur par conduction est meilleur pour la position de source plus proche aux parois froides, par contre le transfert par convection est meilleur pour la position de la source le plus éloigné aux parois froides.

# **Conclusion générale**

Vu son importance dans les nombreuses applications industrielles, la convection dans les espaces confinés a poussé un très grand nombre de chercheurs à investir ce domaine tant sur le plan expérimental que sur le plan numérique.

Cet intérêt nous a motivés pour modéliser et simuler les transferts de chaleur par convection naturelle dans une cavité triangulaire partiellement chauffée en présence de nanofluide. Ce problème a été abordé avec une approche numérique basée sur la méthode des volumes finis pour la résolution des équations gouvernantes basées sur l'approximation de Boussinesq.

Après une validation portant sur un cas similaire traité par **Ouyahia et al [22]**, on a élargi l'étude par une analyse paramétrique basée essentiellement sur l'influence de la fraction volumique, nombre de Rayleigh, la taille de la source et son emplacement.

Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

- le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh  $Ra$ , le diamètre de la source  $D$  et de la concentration volumique de nanofluide  $\phi$ ,
- le transfert de chaleur prend le mode de la conduction pour le nombre de Rayleigh  $Ra$  inférieur à  $10^4$  et le mode de la convection pour le nombre de Rayleigh  $Ra$  supérieur à  $10^4$ .
- le transfert est meilleur pour la position la plus proche des parois froides pour  $Ra < 10^4$ , par contre le transfert est meilleur pour la position la plus éloignée aux parois froides pour  $Ra > 10^4$

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 :

- Le régime turbulent pour compléter cette investigation,
- Le mode de transfert de chaleur par convection mixte,
- Une source de température variable
- Des parois ondulées.





# Liste des références

- [1] N. Souici , L. Ksouri , Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte partiellement chauffée et remplie de deux fluides non miscibles (air/nanofluide), Thème de master, universite Abderrahmane mira bejaia , bejaia, Année Universitaire 2018-2019.
- [2] H. Lanez, « Optimisation du bilan thermique d'un circuit de refroidissement du solvant Lourd en présence du phénomène d'encrassement », mémoire de master, université Echahid Hamma Lakhdar, el oued- Algérie, année universitaire 2013- 2014.
- [3] W. Korichi, « simulation numérique d'une plaque bidimensionnelle avec source de Chaleur », mémoire de master, Université Mohamed Khaider, Biskra- Algérie année universitaire 2013- 2014.
- [4] M. Larget, «Contribution a l'évaluation de la dégradation du béton : thermographie infrarouge et couplage de techniques», thèse de Doctorat, Université de Bordeaux- France(2011).
- [5] M.Bordjane, «cours modes transfert thermique», 3ème année licence, Université Mohamed Boudiaf, Oran- Algérie (2017).
- [6] S.Tabet, « Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée », thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf Oran Algérie (2017).
- [7] J.L.Battaglia, A.Kusiak et J.R.Puiggali, «Introduction aux transferts thermiques», cour et exercices corrigés 2<sup>ème</sup> édition licence (2010).
- [8] S. Saddam, «Amélioration de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur à ailette elliptique creuse », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'silla- Algérie, année universitaire 2014-2015.
- [9] M. Benmerabet, «Modélisation et simulation des phénomènes de transfert thermique par convection assistés par le mouvement fluide», mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba- Algérie , année universitaire 2016-2017.
- [10] N. Laaroussi, «Contribution à la simulation numérique des transferts de chaleur par conduction, rayonnement et convection thermo-solutales dans les cavités», Thèse de doctorat, PARIS-EST (2008).
- [11] F. Khider, « Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'silla- Algérie, année universitaire 2014-2015.
- [12] Loan C POPA, «Modélisation numérique du transfert thermique, méthode des volumes finis», Edition: Publisher: Universitaria ISBN, (2002).
- [13] R. Laidaoui, «Modélisation et simulation d'un processus à changement de phase Liquide-Solide», mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba- Algérie , année universitaire 2015-2016.

- [14] H.E Chouireb, «Simulation numérique de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur radial (pour application des diodes électroluminescente, LED) », mémoire de master, Université de M'sila Faculté de Technologie, Année universitaire 2017– 2018.
- [15] A. Noukas, D. Rebia, «Effet de la dimension d'un coude arrondi sur l'amélioration du transfert thermique : application pour les nanofluides», mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Année universitaire 2019 – 2020.
- [16] S.K Das, S.U.Choi, W.Yu, T. Pradeep, «Nanofluids Science and Technology ». Livre WILEY (2007).
- [17] F. Abbad, A. Manseur, « simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités en présence d'un nanofluide», mémoire de master, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, Année universitaire 2018 – 2019.
- [18] E.E. Michaelides, « Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties», Springer International Publishing Switzerland. (2014).
- [19] C.Y . Tsai, H.T.chien, P.P Ding, B Chan, T, Y Luh, P.H Chen, « Effet of structural character of gold nanoparticules in nanofluide on heat pipe thermal performans », Materiel Letters 58, pp.1461-1465, (2004).
- [20] S.C. Tseng, C.W Lind and K.D huang, « heat transfer enhancement of naofluids in Rotary Blade Coupling of new correlations», International journal of Heat and Mass transfer 52.pp, 4675-4682, (2009).
- [21] W. Boudaoud, « Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides», thèse de doctorat, Oran University of Science and Technology - Mohamed Boudiaf, Oran, Année Universitaire 2018-2019
- [22] S.E. Ouyahia, Y.K. Benkahla, W. Berabou, M. Benzema, A. Boudiaf, « Convection naturelle d'un nanofluide confiné dans une enceinte triangulaire : Effet du fractionnement et de la position de la source de chaleur», 23<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Lille, 28 Août au 1er Septembre (2017).
- [23] S. M. Aminossadati and B. Ghasemi, «Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure», European Journal of Mechanics. B/Fluids, vol. 28, no. 5, pp. 630–640, 2009.
- [24] B. Ghasemi and S. M. Aminossadati, «Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection », International Journal of Thermal Sciences, vol. 49, no. 6, pp. 931–940, 2010.
- [25] B. Boudjeniba, S. Laouar , El Hacene Mezaache, «Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant un nanofluide», 2<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15). archives.umc.edu.dz Constantine, Algérie. 25-26 Novembre 2015.

- [26] 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, no. 5, pp. 1326–1336, 2008.
- [27] 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).
- [28] Z. Belmihoub, R. Mekhnache, «Effet de la dispersion thermique dans un milieu poreux non darcéen en convection mixte et de masse simultanée», mémoire de master, UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA, Année universitaire 2016 – 2017.
- [29] S.S Briki & A. Mekefes, «etude numerique de l'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans une cavite remplie de nanofluide», mémoire de master, Mohamed Boudiaf University of M'sila, Année unversitaire 2019 – 2020.

## المخلص

تتم دراسة الحمل الحراري الطبيعي عددياً في تجويف مثلثي تكون جدرانه المائلة من التجويف البارد متساوي الحرارة  $T_F$  ، بينما تكون قاعدته معزولة حرارياً. من ناحية أخرى ، تم تجهيز التجويف بمصدر حراري أسطواني حراري ساخن بقطر  $T_C$ . استخدمنا السائل النانوي ماء +  $TiO_2$ . يتم أخذ التركيز الحجمي للسائل النانوي بين  $0.01 \leq \phi \leq 0.05$ . يتراوح عدد رايلي بين  $10^3$  و  $10^6$ . الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير لحجم الجسيمات النانوية وتغير رقم رايلي وموقع المصدر  $h$  على تحسين انتقال الحرارة بالحمل الحراري. تظهر نتائج المحاكاة أن انتقال الحرارة يزيد من زيادة رقم رايلي  $Ra$  و قطر المصدر  $D$  والتركيز الحجمي للسائل النانوي  $\phi$ .  
الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي ، التجويف الثلاثي ، رقم رايلي ، التركيز الحجمي للسائل النانوي

## RESUME

La convection naturelle est étudiée numériquement dans une cavité triangulaire dont les parois inclinées de la cavité sont isothermes froides  $T_F$ , alors que sa base est isolée thermiquement. D'autre part, la cavité est munie d'une source de chaleur cylindrique isotherme chaude  $T_C$  de diamètre  $D$ . On utilise le nanofluid eau+  $TiO_2$ . La fraction volumique des nanoparticules est prise dans l'intervalle  $0,01 \leq \phi \leq 0,05$ . Le nombre de Rayleigh est compris entre  $10^3$  et  $10^6$ . L'objectif de cette étude d'étudier l'effet de la fraction volumique des nanoparticules et la variation du nombre de Rayleigh et la position de la source  $h$  sur l'amélioration du transfert de chaleur convectif. Les résultats de la simulation montrent que le transfert thermique augmente l'augmentation du nombre de Rayleigh  $Ra$ , le diamètre de la source et de la concentration volumique de nanofluid  $\phi$ .

**Mots clés :** Convection naturelle, cavité triangulaire, nombre de Rayleigh, La concentration volumique de nanofluides.

## ABSTRACT

Natural convection is studied numerically in a triangular cavity whose inclined walls of the cavity are cold isothermal  $T_F$ , while its base is thermally insulated. On the other hand, the cavity is equipped with a hot isothermal cylindrical heat source  $T_C$  of diameter  $D$ . We used the nanofluid water +  $TiO_2$ . The volume fraction of the nanoparticles is taken in the interval  $0.01 \leq \phi \leq 0.05$ . The Rayleigh number is between  $10^3$  and  $10^6$ . The objective of this study to study the effects of the volume fraction of the nanoparticles and the variation of the Rayleigh number and the position of the source  $h$  on the improvement of the convective heat transfer. The results of the simulation show that the heat transfer increases the increase of the Rayleigh number  $Ra$ , the diameter of the source  $D$  and the volumetric concentration of nanofluid  $\phi$ .

**Keywords:** Natural convection, triangular cavity, Rayleigh number, Volume concentration of nanofluids