

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT PHYSIQUE

N° :...../2020.....



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Énergétique et  
Energie renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Réalisé Par:

FAID Hanane

CHERIEF Kalthoum

Intitulé

**Etude numérique de la convection  
naturelle dans une cavité différentiellement  
chauffée remplie de nano-fluide.**

Soutenu le /06 /2020 devant le jury composé de:

KHALFALLAH Fares	Université de M'sila	Président
BENDERRADJI Razik	Université de M'sila	Rapporteur
TALOUB Djedid	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

***Dédicace***

*Je dédie ce mémoire :*

*Ames chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien leur*

*Encouragement.*

*Mes frères et mes sœurs.*

*Toute ma famille.*

*Toutes mes amies.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de*

*L'enseignement supérieur.*

*La promotion de master 2 physique énergétique, énergie renouvelable, de*

*l'année universitaire 2019-2020 de M'sila.*

***Hanane***

***Dédicace :***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes chers parents*

*À mon frère Badr et ma sœur Omaima*

*À mon cher mari Abdou*

*À toutes mes amis(es)*

*À toute la promotion de master2 physique énergétique et énergies renouvelables.*

*À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité*

## *Remerciements :*

Nous remercions **Dieu** pour le courage et la volonté sans lesquels cette étude n'aurait jamais vu le jour.

Nos vifs remerciements vont à nos très chers parents pour leurs efforts fournis et leurs conseils pendant toute ces années d'études.

D'abord nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à notre encadreur **Dr. BENDERRADJI Razik** pour son inestimable aide et sa disponibilité, sa gentillesse et ces conseils judicieux tout au long de ce travail. , qui sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils précieux, n'aurait pas été accompli.

Nos vifs remerciements vont également aux Membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements les plus vifs au **Dr. KHALFALLAH Fares** pour avoir accepté de présider le jury, nous tenons à exprimer nos remerciements au **Dr. TALOUB Djedid** , d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail.

Et enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **Table des matières**

Dédicace	<b>i</b>
Remerciement	<b>ii</b>
Nomenclature	<b>iii</b>
Liste des figures	<b>vii</b>
Liste des tableaux	<b>xi</b>
Introduction générale	<b>1</b>

## **Chapitre I: Analyse Bibliographique**

<b>I.1</b>	Introduction	<b>4</b>
<b>I.2</b>	Synthèse bibliographique	<b>5</b>
<b>I.3</b>	Généralité sur les Nanofluides	<b>32</b>
<b>I.3.1</b>	Définition	<b>32</b>
<b>I.3.2</b>	Préparation des nanofluides	<b>33</b>
<b>I.3.3</b>	Les applications de nanofluides	<b>33</b>
<b>I.3.4</b>	Autres applications	<b>35</b>
<b>I.3.5</b>	Les avantages des nanofluides	<b>35</b>
<b>I.3.6</b>	Les inconvénients des nanofluides	<b>35</b>
<b>I.3.7</b>	Propriétés thermo physiques	<b>35</b>
<b>I.3.7.1</b>	Pour les nanofluides	<b>35</b>
<b>I.3.7.2</b>	Pour les nanofluids hybrides	<b>40</b>
<b>I.4</b>	Généralité sur le transfert de chaleur	<b>41</b>
<b>I.4.1</b>	Introduction	<b>41</b>
<b>I.4.2</b>	Transfert de chaleur par conduction	<b>41</b>
<b>I.4.3</b>	Transfert de chaleur par rayonnement	<b>42</b>
<b>I.4.4</b>	Transfert de chaleur par convection	<b>42</b>

<b>I.4.4.1</b>	La convection naturelle	<b>43</b>
<b>I.4.4.2</b>	La convection forcée	<b>44</b>
<b>I.4.4.3</b>	La convection mixte	<b>44</b>
<b>I.4.5</b>	La convection dans les enceintes	<b>44</b>
<b>I.4.5.1</b>	Enceinte avec gradient verticale de température	<b>45</b>
<b>I.4.5.2</b>	Déplacement d'une goutte de fluide	<b>45</b>
<b>I.4.5.3</b>	Trainée visqueuse et diffusion de la chaleur	<b>46</b>
<b>I.4.5.4</b>	Enceinte avec gradient horizontale de température	<b>47</b>

## **Chapitre II: Formulation Mathématique et Numérique**

<b>II.1</b>	Introduction	<b>49</b>
<b>II.2</b>	Définition géométrique	<b>49</b>
<b>II.3</b>	Equations gouvernantes	<b>50</b>
<b>II.3.1</b>	Equation de continuité	<b>50</b>
<b>II.3.2</b>	Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)	<b>50</b>
<b>II.3.3</b>	Equation de conservation d'énergie	<b>50</b>
<b>II.4</b>	Les hypothèses simplificatrices	<b>51</b>
<b>II.5</b>	Propriétés thermo-physiques de nanofluide	<b>52</b>
<b>II.6</b>	Equations du problème	<b>52</b>
<b>II.6.1</b>	Equations de continuité	<b>52</b>
<b>II.6.2</b>	Equations de quantité de mouvement	<b>53</b>
<b>II.6.3</b>	Equations de l'énergie	<b>53</b>
<b>II.7</b>	Formulation adimensionnelle du problème	<b>53</b>
<b>II.7.1</b>	Forme adimensionnelle de l'équation de continuité	<b>53</b>

<b>II.7.2</b>	Forme adimensionnelle des équations de quantité de mouvement	<b>54</b>
<b>II.7.3</b>	Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie	<b>56</b>
<b>II.8</b>	Conditions aux limites	<b>56</b>
<b>II.9</b>	Les nombres sans dimension	<b>57</b>
<b>II.9.1</b>	Nombre de Reynolds	<b>57</b>
<b>II.9.2</b>	Nombre de Prandtl	<b>58</b>
<b>II.9.3</b>	Nombre de Grashof	<b>58</b>
<b>II.9.4</b>	Nombre de Rayleigh	<b>58</b>
<b>II.9.5</b>	Nombre de Nusselt	<b>59</b>
<b>II.10</b>	Modèle Numérique	<b>59</b>
<b>II.10.1</b>	Procédure Numérique	<b>60</b>
<b>II.11</b>	Maillage	<b>61</b>
<b>II.12</b>	Présentation des logiciels Gambit et Fluent	<b>63</b>
<b>II.12.1</b>	GAMBIT	<b>63</b>
<b>II.12.2</b>	FLUENT	<b>63</b>

### **Chapitre III: Résultats et Discussion**

<b>III.1</b>	Introduction	<b>67</b>
<b>III.2</b>	Choix du maillage	<b>67</b>
<b>III.3</b>	Validation des résultats	<b>68</b>
<b>III.4</b>	Discussion des résultats	<b>70</b>
<b>III.4.1</b>	Effet de concentration des nanoparticules	<b>70</b>
<b>III.4.2</b>	Effet de la nature de nanofluide	<b>81</b>
<b>III.5</b>	Conclusion générale	<b>84</b>

# Nomenclature

## Symboles Latins

$C_p$	la chaleur massique ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$C_{p_f}$	la chaleur massique de fluide ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$C_{p_s}$	la chaleur massique de fluide ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$C_{p_{nf}}$	la chaleur massique de nanofluide fluide ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$C_{p_{nfh}}$	la chaleur massique de nanofluide fluide hybride ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$G$	Accélération de la pesanteur ( $m.s^{-2}$ )
$h$	le coefficient d'change par convection ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
$K$	La conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$K_f$	La conductivité thermique du fluide de base ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$K_p$	La conductivité thermique des particules solides ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$K_{nf}$	La conductivité thermique de nanofluide ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$K_{nfh}$	La conductivité thermique de nanofluide hybride ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$L$	Longueur de cavité (m)
$n$	est un facteur de forme empirique
$M$	Emittance [ $W/m^2$ ].
$m$	La masse (Kg)
$p$	pression du fluide (Pa)
$P$	pression adimensionnelle
$S$	Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).
$T$	la température (0 C) ou (K)
$T_c$	la température de paroi chaude
$T_f$	la température de paroi froide
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température.
$V_p$	volume des particules solides [ $m^3$ ]

$V_T$  volume totale [ $m^3$ ]

### Symbole grecs

$\alpha$	la diffusivité thermique ( $m^2.s^{-1}$ ).
$\beta$	coefficient d'expansion thermique ( $K^{-1}$ ).
$\beta_p$	coefficient d'expansion thermique de nanoparticule ( $K^{-1}$ ).
$\beta_f$	coefficient d'expansion thermique de fluide ( $K^{-1}$ ).
$\beta_{nf}$	coefficient d'expansion thermique de nanofluide ( $K^{-1}$ ).
$\beta_{nfh}$	coefficient d'expansion thermique de nanofluide hybride ( $K^{-1}$ ).
$\varphi$	La fraction volumique
$\mu$	La viscosité dynamique ( $N.s.m^{-2}$ ).
$\mu^f$	La viscosité dynamique du fluide de base
$\mu_{nf}$	La viscosité dynamique du nanofluide.
$\mu_{nfh}$	La viscosité dynamique du nanofluide.
$\rho_f$	Masse volumique du fluide
$\rho_s$	Masse volumique de la nanoparticule.
$\rho_{nf}$	Masse volumique du nanofluide.
$\rho_{nfh}$	Masse volumique du fluide
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).
$\Phi$	Flux de chaleur
$\Psi$	le modèle de Hamilton et Crosser

### Indice

C	chaude
f	froid
$f$	Fluide de base
$nf$	nanofluide.

*nfh*            nanofluide hybride

S              Particules solide.

### **Nombre adimensionnel**

Pr              Nombre de Prandtl

Ra              Nombre de Rayleigh

Re              Nombre de Reynolds

Gr              Nombre de Grashof

Nu              nombre de Nusselt local sur la surface de la source de chaleur

Nu<sub>m</sub>            nombre de Nusselt moyen au le long de la partie chauffée

## Liste des figures

Numéro de figure	Titre de figure	Page
<b>I.1</b>	schéma présentatif de transfert convectif [21].	43
<b>I.2</b>	Principe physique de la convection naturelle [6].	44
<b>I.3</b>	schéma de la convection dans une cavité avec gradient horizontale de température [11].	45
<b>I.4</b>	schéma représentant de déplacement d'une goutte de fluide [18].	46
<b>I.5</b>	schéma représentant la force e trainée visqueuse [18].	46
<b>I.6</b>	Schéma de la convection dans une enceinte avec gradient horizontale de température [2].	47
<b>II.1</b>	Schéma représentant l'enceinte à une source de chaleur localisée au milieu	49
<b>II.2</b>	Volume de contrôle bidimensionnel	<b>60</b>
<b>II.3</b>	Schéma du maillage	<b>62</b>
<b>II.4</b>	Le maillage utilisé	<b>62</b>
<b>II.5</b>	Evolution de résidu	<b>63</b>
<b>III.1</b>	Convergence du nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée pour $Ra=10^3$ .	<b>68</b>
<b>III.2</b>	Profil de vitesse le long de $y=0.5$ pour $Ra=10^3$ .	<b>68</b>
<b>III.3</b>	Comparaison des isothermes, $Ra=10^5$ (a) Présent travail (b) Résultats Expérimentaux de Calcagni et al [24].	<b>69</b>
<b>III.4</b>	Comparaison des isothermes (a)Présent travail (b) Résultats numériques de Calcagni et autres [24].	<b>69</b>
<b>III.5</b>	Comparaison de la variation du Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude	<b>70</b>
<b>III.6</b>	Les contours des Isothermes du (Cu-eau), pour différentes concentrations.	<b>72</b>
<b>III.7</b>	Les contours des Isothermes du (Ag-eau) pour différentes concentrations.	<b>73</b>
<b>III.8</b>	Les contours des Isothermes du (Ag – Cu / eau), pour différentes concentrations	<b>74</b>
<b>III.9</b>	Profil de la température le long de la section médiane de l'enceinte ( $y=0.5$ ) pour différents Nanofluide	<b>75</b>
<b>III.10</b>	Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Cu-eau), pour différentes concentrations source localisé au milieu.	<b>77</b>

<b>III.11</b>	Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag-eau), pour différentes concentrations source localisé au milieu	<b>78</b>
<b>III.12</b>	Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du( Ag-Cuo /eau)pour différentes concentrations source localisé au milieu.	<b>79</b>
<b>III.13</b>	Variation du Nusselt local sur la paroi chaude pour différentes nanofluides.	<b>80</b>
<b>III.14</b>	Profil de Nombre du Nusselt moyen au long de la source de chaleur au milieu de l'enceinte pour différentes nombre de Rayleigh et différentes types des nanofluides.	<b>81</b>
<b>III.15</b>	Nusselt moyen pour les différents nanofluides et hybride en fonction de la concentration volumique ( $Ra = 10^5$ ).	<b>82</b>
<b>III.16</b>	Profil de la température statique de la section médiane pour différents nanofluides et hybride, concentration volumique $\phi = 0.04$ et $Ra = 10^5$ .	<b>83</b>
<b>III.17</b>	Profil de la vitesse transversale le long de la partie centrale de l'enceinte pour différents nanofluides et hybride, concentration volumique $\phi = 0.04$ et $Ra = 10^5$	<b>83</b>

#### La liste des tableaux

<b>Numéro de tableau</b>	<b>Titre de tableau</b>	<b>Page</b>
<b>II.1</b>	propriétés thermophysiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs	<b>52</b>
<b>II.2</b>	conditions aux limites hydrodynamiques et thermiques sous forme adimensionnelles	<b>57</b>

## Introduction générale

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermophysiques des fluides utilisés. Le transfert thermique au sein des nanofluides ouvre depuis plusieurs années un portail de recherche important pour les études expérimentales, analytiques et numériques menant ce domaine à des publications liées à l'utilisation des nanofluides comme des fluides actifs. La présence des nanoparticules dans le fluide traditionnel améliore le transfert thermique d'une manière remarquable par rapport à un fluide traditionnel.

Récemment, des progrès importants se font dans un domaine de recherche fascinant de la physique : c'est la nanophysique qui brasse un large éventail de la physique, la nanophysique connaît un développement et à l'échelle du nanomatériau et de la nanotechnologie. Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur. Elles permettent des innovations très prometteuses dans de nombreux domaines fondamentaux tels que : la santé, l'énergétique et l'industrie... Les nanofluides tiennent déjà une place privilégiée concernant à titre d'exemple des fluides traditionnels (Eau, Éthylène glycol, etc.....).

L'objectif de notre étude consiste à étudier numériquement de l'écoulement laminaire stationnaire par convection libre dans une cavité carrée bidimensionnelle remplie le cas de fluide pur l'eau, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu) et nanoparticule hybride(Ag- CuO),chauffée isothermiquement par le bas. En effet, 1/3 de la surface de la paroi inférieure est chauffée par une source de chaleur ( La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les deux parois verticales latérales sont refroidies et la paroi supérieure est maintenue adiabatique, pour un nombre de Rayleigh variant de 103 à 105, et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.0, 0.02, 0.04, 0.2 et 0.4). Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance (Power- Low) Dans ce contexte, trois chapitres ont été présentés dans cette mémoire.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les différents modes de transfert de chaleur et les nanofluides( nanofluides et nanofluides hybride ), et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à définir dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées, ainsi que la formulation numérique.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les principaux résultats numériques de cette simulation ou nous avons étudié l'effet du maillage, validé nos résultats ainsi que leurs interprétations et analyse.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin de ce mémoire. Quelques recommandations pour les études futures sont également formulées.

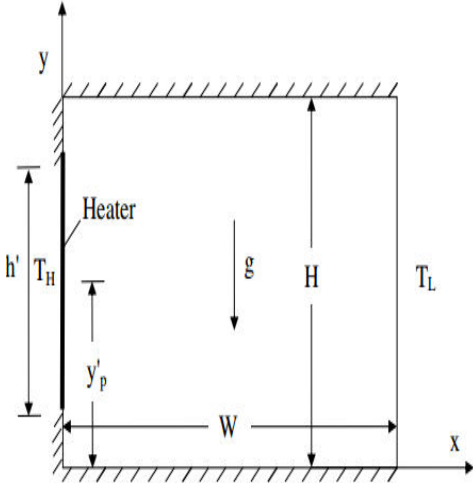
# CHAPITRE I

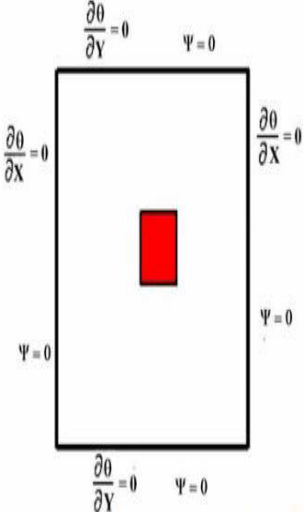
## **I.1. Introduction**

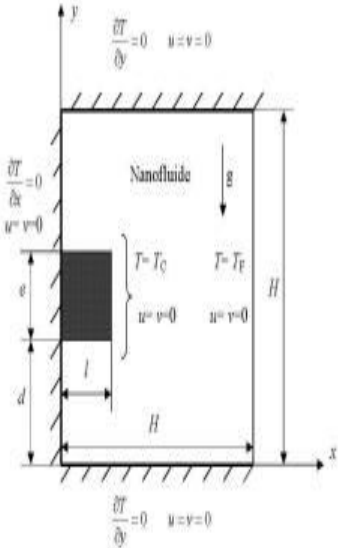
Ce chapitre a pour but de présenter les connaissances actuelles relatives à la convection naturelle dans les enceintes, les nanofluides et leurs applications éventuelles, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental. L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieurs travaux, et pour ce faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes géométrant la convection, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques).

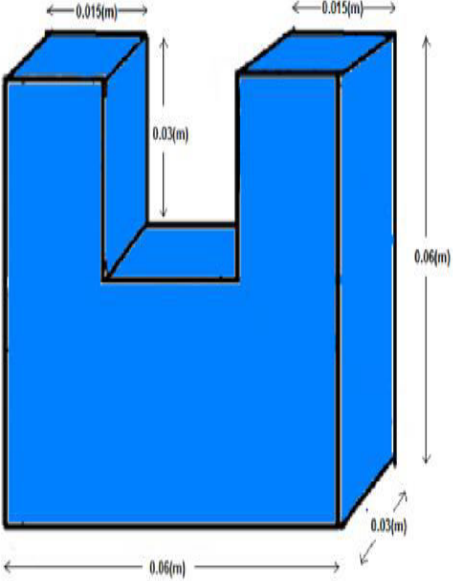
Mais avec l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du 20ème siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle richesse. La convection naturelle dans les enceintes se rencontre dans de nombreux systèmes d'ingénierie tels que la convection dans les bâtiments, le mouvement des fluides dans les collecteurs d'énergie solaire, le refroidissement des circuits électroniques et le refroidissement des réacteurs nucléaires, etc. Le principal avantage de la convection naturelle réside dans la fiabilité, car le mouvement de l'air est simplement généré par des gradients de densité locaux en présence du champ gravitationnel, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des moteurs tels que des pompes ou des ventilateurs

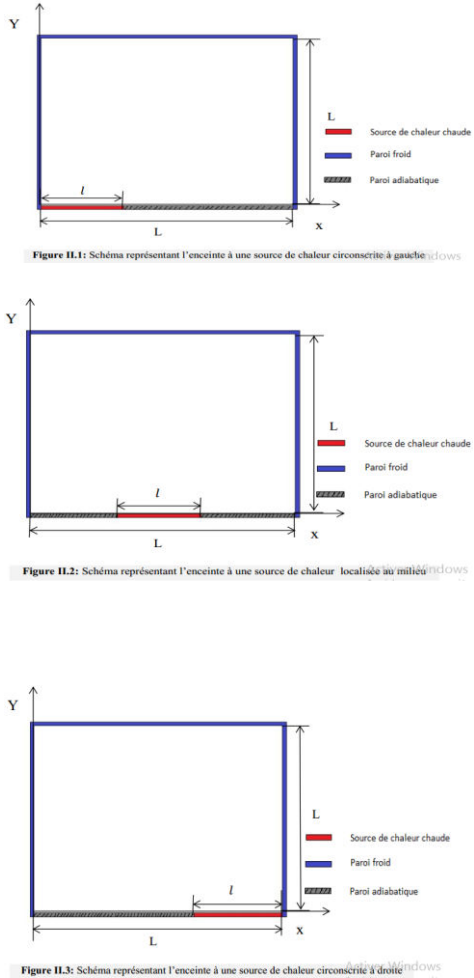
I.2. Synthèse bibliographique

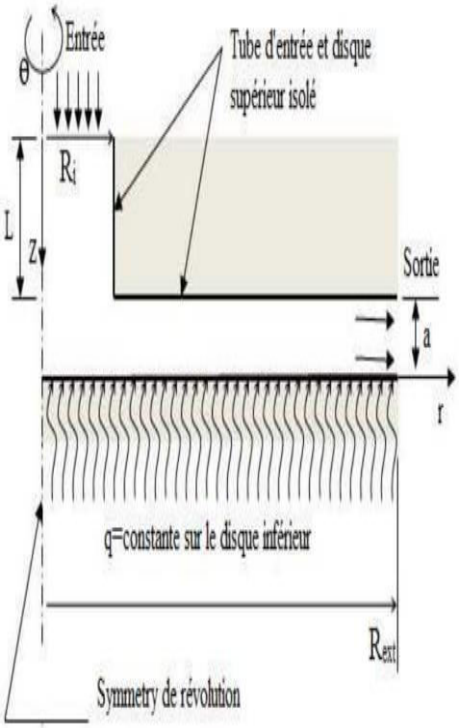
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>Hakan F.Oztop , Eiyad Abu-Nada.[1]</b></p>	<p>2008</p>	 <p>Fig. 1. Sketch of problem geometry and coordinates.</p>	<p><math>10^3 \leq Ra \leq 5 \times 10^5</math></p> <p><math>0 \leq \phi \leq 0.2</math></p> <p><math>0.1 \leq \text{hauteur du radiateur} \leq 0.75</math></p> <p><math>0.25 \leq \text{emplacement du radiateur} \leq 0.75</math></p> <p><math>0.5 \leq \text{ratio d'aspect} \leq 2</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>Les résultats ont montré l'efficacité de l'utilisation de valeurs élevées de champ magnétique dans l'amélioration du transfert de chaleur à l'aide de nanofluides.</p> <p>L'augmentation de la valeur du nombre de Rayleigh et de la taille du réchauffeur améliore le transfert de chaleur et la force d'écoulement en maintenant les autres paramètres fixes.</p> <p>Le type de nanofluide est un facteur clé pour l'amélioration du transfert de chaleur. Les valeurs les plus élevées sont obtenues lors de l'utilisation de nanoparticules de Cu.</p> <p>La différence de transfert de chaleur, en utilisant différents nanofluides, augmente avec l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules.</p> <p>Lors de l'augmentation de la taille du réchauffeur, la différence de valeurs de transfert de chaleur augmente et dépend principalement du type de nanofluide utilisé.</p> <p>Pour les enceintes rectangulaires, l'amélioration du transfert de chaleur, en raison de la présence de nanoparticules, est plus prononcée à un rapport d'aspect faible qu'à un rapport d'aspect élevé.</p>

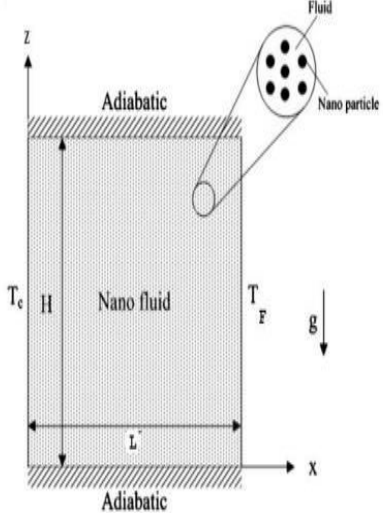
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>H. Salhi et M. Si- Ameur. [2]</b></p>	<p>2012</p>	 <p>Fig. 1: Schéma représentant la configuration étudié et les conditions aux limites</p>	<p><math>Ra = 10^3 - 10^4 - 10^5</math></p> <p><math>\phi = 0 - 0.1 - 0.2</math></p> <p><math>Pr = 6.2</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>L'augmentation des fractions volumiques résulte une déviation importante pour les isothermes entre le nanofluide et le fluide pur.</p> <p>La comparaison entre les deux nanofluides utilisés montre que l'argent présente un transfert thermique plus important que l'oxyde de titane TiO<sub>2</sub>.</p> <p>On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh pour chaque nanofluide.</p> <p>On observe que les valeurs du nombre de Nusselt pour le nanofluide Ag sont supérieures à celles du nanofluide TiO<sub>2</sub> (pour différentes valeurs de nombre de Rayleigh). Ce qui montre que l'argent est un bon conducteur de chaleur par rapport au TiO<sub>2</sub>.</p> <p>l'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé.</p> <p>l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise davantage le transfert de chaleur.</p> <p>le transfert thermique en présence des nanoparticules d'Ag s'améliore relativement à celui des nanoparticules de TiO<sub>2</sub>. En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.</p>

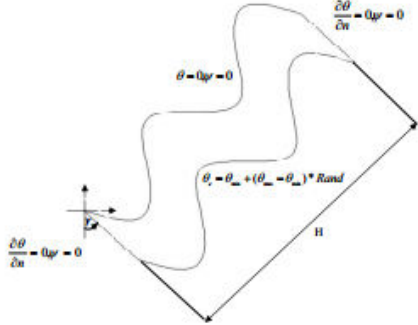
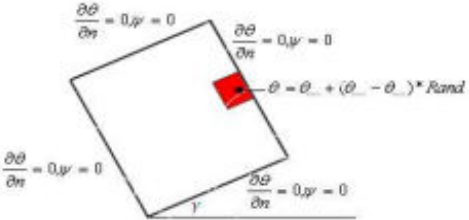
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>Mohamed EL HATTAB, Rachid MIR, Youness EL HAMMAMI, Touria MADIOUNI.[3]</b></p>	<p>2013</p>	 <p>Figure 1: Schéma de la configuration étudiée et les conditions aux limites</p>	<p><math>Ra = 10^3 - 10^6</math></p> <p><math>\phi = 0 - 0.1</math></p> <p><math>Pr = 6.2</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>Dans cet article, le problème du transfert de chaleur par convection naturelle des nanofluides confinés dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur isotherme a été résolu numériquement. L'influence de certains paramètres tels que, la fraction volumique, le type des nanoparticules et le nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur a été étudié. Cette étude a permis de dégager les conclusions suivantes :</p> <p>le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique en nanoparticules et le nombre de Rayleigh.</p> <p>L'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur est plus important à faible nombre de Rayleigh.</p> <p>Le transfert de chaleur en présence des nanoparticules de cuivre est amélioré comparativement aux résultats obtenus avec des nanoparticules de <math>Al_2O_3</math> ou <math>TiO_2</math>.</p> <p>On remarque que pour une fraction volumique donnée, <math>Nu_m</math> augmente quand <math>Ra</math> augmente. Pour toutes les valeurs de <math>Ra</math>, le nombre de Nusselt moyen augmente avec la fraction volumique en nanoparticules. Cette augmentation est due à l'amélioration de la conductivité thermique effective du nanofluide, lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente.</p> <p>L'effet des nanoparticules est plus important à faible <math>Ra</math>, par exemple l'augmentation de 10% de la fraction volumique en <math>Al_2O_3</math>, <math>Cu</math> et <math>TiO_2</math> augmente respectivement le nombre de Nusselt moyen d'environ 12%, 14% et 9% pour <math>Ra = 10^6</math> et d'environ 28%, 29% et 23% pour <math>Ra=10^3</math>.</p>

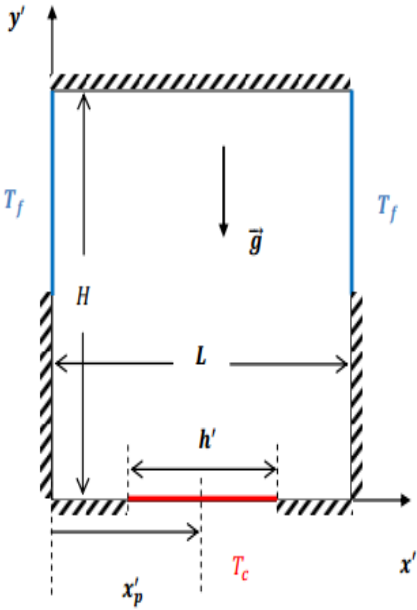
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
Soufi El Habib. [4]	2013	 <p style="text-align: center;">Schéma 1 : la cavité en forme U.</p>	$\phi = 0.01-0.15$ $Ra = 10^3-10^6$	Volumes Finis	<p>L'utilisation des nanofluides pour augmenter le transfert de chaleur en convection Natural est considéré comme une technique nouvelle qui peut répondre aux exigences de l'industrie avec une manière efficace.</p> <p>les résultats que nous avons obtenu à partir de l'étude numérique des effets de variation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh sur la performance du transfert de chaleur d'un nanofluide (<math>Al_2O_3</math>-eau).</p> <p>-l'augmentation de la fraction volumique de nanofluide et le nombre de Rayleigh peut améliorer la performance du transfert de chaleur convective dans une cavité géométrique donnée.</p> <p>le nanofluide est un fluide favorable pour les systèmes des refroidissements par rapport les autre fluide (les fluides de base).</p>

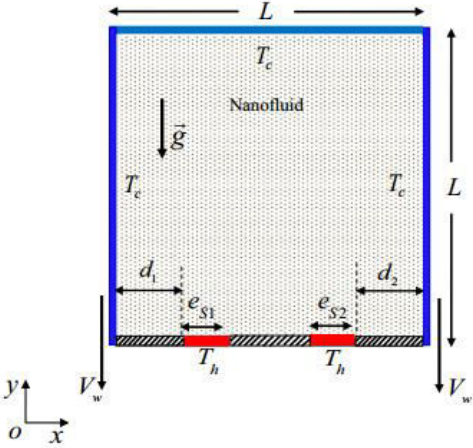
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>LEBBI HI Saci.[5]</b></p>	<p>2014</p>	 <p>Figure II.1: Schéma représentant l'enceinte à une source de chaleur circonscrite à gauche</p> <p>Figure II.2: Schéma représentant l'enceinte à une source de chaleur localisée au milieu</p> <p>Figure II.3: Schéma représentant l'enceinte à une source de chaleur circonscrite à droite</p>	<p><math>Ra = 10^3, 10^4, 10^5, 10^6</math></p> <p><math>\phi = 0, 0.1, 0.2</math></p>	<p>volumes fins</p>	<p>Les résultats que nous avons obtenus ici tendent à relativiser l'influence du mouvement brownien dans l'amélioration de la conductivité thermique effective des nanofluides. La conduction thermique au sein du fluide et entre le fluide et les nanoparticules semble être le facteur dominant de cette amélioration.</p> <p>On peut remarquer que ces améliorations importantes (pour une faible fraction volumique inférieure à 0,3, notre étude) En particulier nous n'avons observé que la conductivité thermique effective de ce nanofluide augmente avec la concentration en nanoparticules.</p> <p>l'augmentation de la conductivité thermique atteint des valeurs importantes (cela justifié par le nombre de Nusselt moyenne et locale, ce dernier caractérise l'échange par conduction par rapport à l'échange par convection).</p> <p>l'augmentation de la fraction volumique de nanofluide et le nombre de Rayleigh peut améliorer la performance du transfert de chaleur convective dans une cavité géométrique donnée.</p> <p>les résultats obtenus ont montré que l'addition des nanoparticules apporte une amélioration du transfert de chaleur.</p>

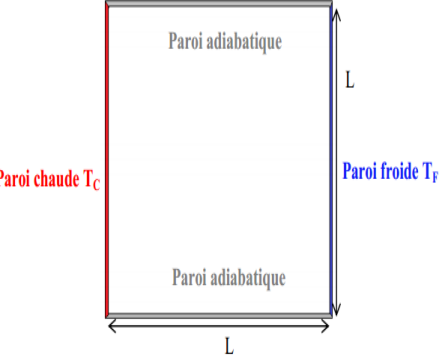
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>KLALECHE Sofiane</b>  <b>MADJOUR Abderrahma</b>                      ne. [6]</p>	<p>2015</p>		<p><math>\Phi \varphi = (0 -2-4-6-8-10)</math></p> <p><math>Re=250, 500, 1000, 1500,2000)</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>Le nanofluide à base l'éthylène glycol présente un refroidissement plus important que celui du nanofluide à base d'eau.</p> <p>Le nanofluide portant la plus grande concentration présente la plus grande valeur du nombre de Nusselt c.à.d. le meilleur transfert thermique.</p> <p>L'ajout des nanoparticules aux fluides de base (Eau- Ethylène Glycol), avec des proportions adéquates (ne dépassant pas 10%) pour éviter l'agrégation, améliore significativement le transfert de chaleur.</p> <p>L'augmentation du transfert de chaleur en convection forcée est proportionnelle à l'augmentation du nombre de Reynolds et la fraction volumique des nanoparticules présentes dans les nanofluides.</p> <p>Le nanofluide à base d'Ethylène Glycol (E.G) présente une meilleure performance en comparaison avec de l'eau.</p>

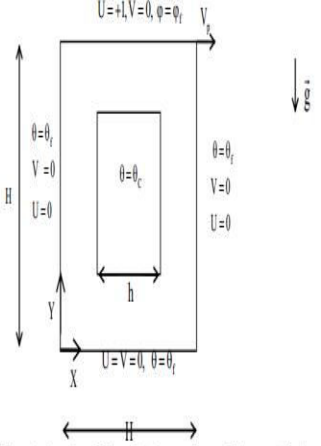
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>EL KHAOUDI FATIMA, GUERAOUI KAMAL,MAN-LAYAKHAF SAMIR.[7]</b></p>	<p>2015</p>	 <p>Figure 1:Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites.</p>	<p><math>Pr = 6.2</math>  <math>\phi = 0, 0.06, 0.2, 0.3</math></p>	<p>volumes finis.</p>	<p>Dans cette étude numérique nous avons modélisé le transfert de chaleur en convection laminaire dans une cavité rectangulaire verticale pour montrer l'amélioration du transfert de chaleur par un nanofluid par rapport à un fluide pur. Les résultats obtenus montrent clairement que l'utilisation des nanofluides peut influencer considérablement le transfert de chaleur dans ce type de géométrie.</p> <p>On constate que la vitesse décroît de la valeur zéro pour atteindre le minimum à environ <math>z=H/4</math> et croit ensuite jusqu'à la valeur zéro sur la paroi droite. En effet, la vitesse est nulle au niveau des parois à cause de l'adhérence.</p> <p>Le nombre de Nusselt moyen augmente avec le nombre de Rayleigh, mais que les valeurs du Nusselt moyen pour le nanofluid sont plus élevées par rapport à celles de l'eau pure. Ceci est dû à l'augmentation de la conductivité du nanofluid par rapport à celle de l'eau pure, ce qui augmente le transfert thermique par diffusion (conduction) à travers la paroi.</p>

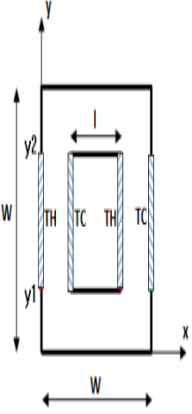
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p>Salhi Hicham. [8]</p>	<p>2015</p>	<p>A :</p>  <p>B :</p> 	<p><math>Ra=10^3, 10^4, 10^5, 10^6.</math></p> <p><math>\gamma= 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ.</math></p> <p><math>\phi=0\_0.1\_0.2</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>Dans ce travaille, on a présenté une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans une enceinte inclinée remplie d'un mélange d'eau et desnanoparticules. Les résultats principaux se résument dans :</p> <p>Le transfert de chaleur est influencé par la température aléatoire et l'angle d'inclinaison dans la cavité.</p> <p>L'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh plus élevé.</p> <p>L'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise d'avantage de transfert de chaleur.</p> <p>L'effet du nombre de Rayleigh qui caractérise l'intensité de la convection naturelle a été mis en évidence, le transfert thermique augmente avec le nombre de Rayleigh, et cet accroissement est plus important lorsque l'angle d'inclinaison est nul, avec fraction volumique égale à 0.2.</p> <p>Le transfert thermique en présence des nanoparticules d'Ag s'améliore relativement à celui des nanoparticules de TiO2. En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.</p> <p>Les paramètres de la géométrie complexe ondulée (longueur d'onde et le rapport d'amplitude) permet d'améliorer le transfert de chaleur.</p>

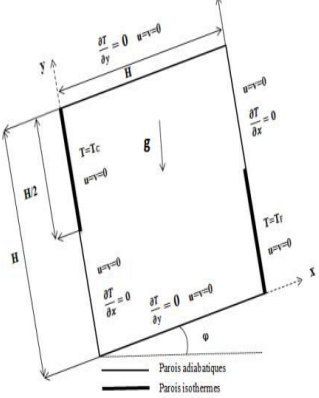
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>Billel BOUDJEN IBA, Salah LAOUAR, El Hacene Mezaache.[ 9]</b></p>	<p>2015</p>	 <p>Figure 1 : modèle physique</p>	<p>Pr= 6.2  Ra=10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup>  φ =0%_10%_20%</p>	<p>différences finies</p>	<p>Le transfert de chaleur est meilleur quand l'élément chauffant est centré <math>x_p=0.5</math>.</p> <p>L'augmentation du nombre de Rayleigh tend à l'amélioration du transfert de chaleur, plus précisément pour des petits allongements c'est-à-dire <math>&lt; 1</math>. Mais l'intensification des transferts de chaleur causée par l'ajout des nanoparticules est plus importante pour des cavités rectangulaires peu allongées.</p> <p>Une suite logique de ce travail consiste à étudier l'importance de l'incorporation d'autres nanoparticules sur l'amélioration des transferts thermiques et à investiguer l'effet de l'augmentation du nombre de Rayleigh avec l'effet de l'inclinaison et les différentes dispositions des éléments chauffants et refroidissants.</p>

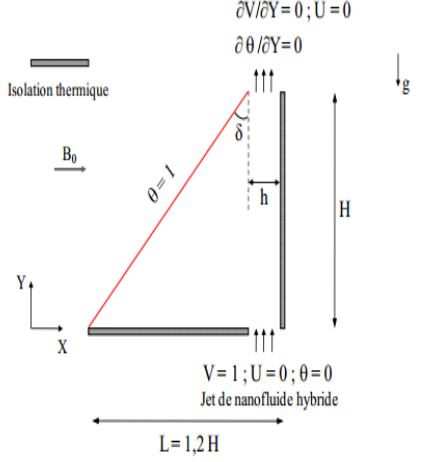
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p>Hamdi Moumni. Hedia Welhezi , Ridha Djebali , Ezeddine Sediki.</p> <p>[10]</p>	<p>2015</p>	 <p>Fig. 1. Schematic of the problem geometry.</p>	<p><math>1 \leq Re \leq 100</math></p> <p><math>1 \leq Ri \leq 20</math></p> <p><math>0 \leq \phi \leq 0.2</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>L'ajout de nanoparticules au fluide de base entraîne une diminution de l'activité du mouvement du fluide et provoque une augmentation substantielle du taux de transfert de chaleur.</p> <p>Lorsque les nombres de Richardson et Reynolds augmentent, tandis que la fraction volumique solide est maintenue constante, le transfert de chaleur le taux augmente.</p> <p>La présence de nanoparticules augmente le transfert de chaleur moyen. Cette amélioration dépend fortement du type de nanofluides. Il convient de noter que le cuivre et l'argent améliorent le taux de transfert de chaleur en raison de cette Conductivité thermique.</p> <p>L'emplacement des deux sources de chaleur affecte également le nombre moyen de Nusselt, ce dernier augmentant à mesure que l'emplacement deux sources de chaleur se déplace respectivement vers les murs gauche et droit. En effet, le nombre moyen de Nusselt, montre le meilleur transfert de chaleur lorsque <math>D = 0</math>.</p>

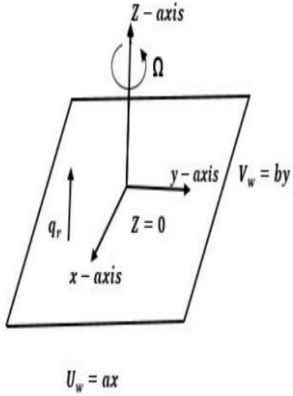
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>DADDA Mouham ed Lamine.</b></p> <p>[11]</p>	<p>2016</p>	 <p>Figure II.1 : Géométrie du problème</p>	<p><math>Ra=10^3\_10^6</math></p> <p><math>Pr= 0.7</math></p>	<p>Volumes finies</p>	<p>La détermination du champ d'écoulement nous a permis d'analyser le comportement du fluide à l'intérieur de cavité. Pour un nombre faible de Rayleigh, de l'ordre de <math>10^3</math>, on a remarqué la dominance du mode de transfert de chaleur par conduction. Au-delà de cette valeur, la convection domine et apparaît d'une manière plus à partir pour <math>Ra = 10^5</math>.</p> <p>En revanche, on a conclu que le nombre de Nusselt moyen augmente parallèlement avec l'augmentation de l'échange thermique, ce qui montre que la convection naturelle est très sensible à la variation du nombre de Rayleigh. On peut dire, alors, que : L'augmentation du nombre de Rayleigh améliore l'écoulement par la convection naturel.</p> <p>Afin de continuer les recherches dans notre domaine d'étude, qui concerne les cavités carrées avec des parois partiellement actives, nous recommandons : D'étendre cette étude à d'autres formes et configurations plus complexes. D'élargir le domaine de simulation en trois dimensions;</p> <p>Etude du problème dans le cas de l'écoulement instationnaire et le régime turbulent.</p> <p>Comparaison entre plusieurs fluides, afin de trouver les meilleurs fluides, permettant d'optimiser le transfert de chaleur</p> <p>Introduire le mode de transfert de chaleur par rayonnement, ainsi que le champ magnétique .</p> <p>Application d'autres types des conditions aux limites.</p>

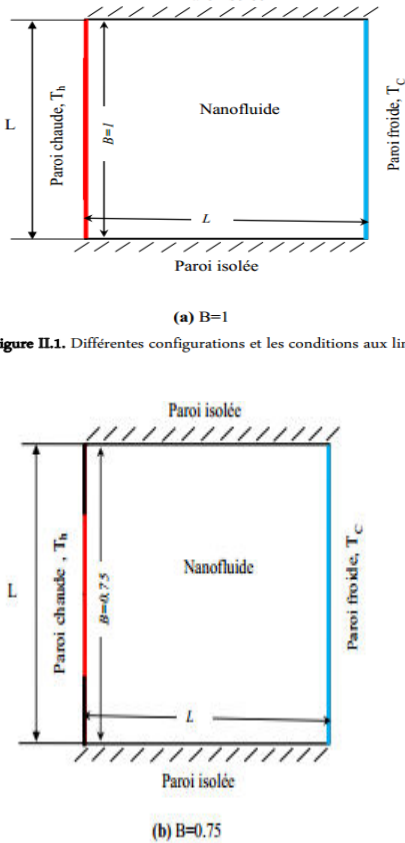
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>Abdelkader BOUTRA</b>  <b>, Karim RAGUI</b>  <b>, Nabila LABSI</b>  <b>, Youb Khaled BENKAHLA,</b>  <b>Rachid BENNACER.</b></p> <p>[12]</p>	<p>2016</p>	 <p>Figure 1 : Schematisation de problème physique et des conditions aux limites.</p>	<p><math>Ri = 0,01\_1\_100</math></p> <p><math>AR = 0.3\_0.5\_0.7</math></p> <p><math>\phi = 0\_0.1</math></p>	<p>Volumes finis</p>	<p>Dans cette étude nous avons mis en évidence l'effet du mode d'écoulement, de la fraction volumique en nanoparticules et du rapport de forme de l'obstacle, sur le comportement hydrodynamique et thermique d'un nanofluide placé dans une cavité dotée d'un obstacle chaud en son centre.</p> <p>Les résultats montrent que lorsque le nombre de Richardson diminue le nombre de Nusselt moyen augmente.</p> <p>L'augmentation de la concentration du nanofluide et du rapport de forme de l'obstacle permet d'améliorer le transfert thermique.</p> <p>Notons que l'addition des nanoparticules élargie l'étendue de la cellule fermée, localisée au-dessus de l'obstacle.</p> <p>Le transfert thermique se fait de l'obstacle chaud vers les molécules du fluide adjacent, par conduction, puis se propage par la suite dans la cavité par convection.</p> <p>Pour la région au-dessus de l'obstacle où les isothermes sont fortement incurvées, l'effet de la convection forcée est dominant. En outre, l'addition de nanoparticules permet une meilleure propagation de la chaleur vers les parois.</p>

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>SAID BOUCHTA, M'BARK FEDDAOUI, HOSSINE EL IHSSINI.</b></p> <p>[13]</p>	<p>2017</p>	 <p>Figure 1: Schéma de la configuration d'étude avec les conditions aux limites.</p>	<p>AR = 0,5</p> <p><math>\phi = 0-0,04</math></p> <p>Ra = <math>10^3-10^6</math></p>	<p>volume fini. Algorithme SIMPLE</p>	<p>Cette différence devient plus forte avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Rayleigh. Cela s'explique par le fait que, avec l'augmentation de la fraction volumique, le nanofluide devient plus visqueux.</p> <p>Le taux de transfert de chaleur augmente par augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Rayleigh.</p> <p>Le transfert de chaleur en présence des nanoparticules de Cu est meilleur que celui obtenu avec des nanoparticules Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub>.</p>

Auteur	Année	configuration	paramètre	Méthode	Observation
<p><b>El hafad BARA, Sakina EL HAMDANI, M. A. BENDOU, M. Karim LIMAM [14]</b></p>	<p>2017</p>	 <p>Figure.1 : Schéma de la configuration étudiée et les conditions aux limites</p>	<p>Pr= 6.2</p> <p>Ra = (10<sup>3</sup>_10<sup>5</sup>)</p> <p>γ = 0°_80°</p> <p>φ = 0_0.1</p>	<p>Volumes finis et Brinkman Modèle de Maxwell-Garnetts.</p>	<p>Le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique en nanoparticules et le nombre de Rayleigh.</p> <p>L'Augmentation de l'angle d'inclinaison de φ = 0 ° à φ = 40° conduit à l'élévation du nombre de nusselt, tandis que le mouvement inverse est observé lorsque l'angle d'inclinaison augmente à partir de φ = 40 ° et φ = 80 °.</p> <p>Le type de nanofluide est un facteur clé pour l'amélioration du transfert de chaleur.</p> <p>Le nombre de Nusselt est une fonction croissante de chacune de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Rayleigh.</p>

Auteur	Année	configuration	paramètre	Méthode	Observation
<p>M. BENZEMA, Y.K. BENKAHL, A.BOUDIAF , S.OUYAHIA</p> <p>[15]</p>	<p>2017</p>	 <p>Figure 1 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles</p>	<p><math>10 \ll Re \ll 400</math></p> <p><math>0 \ll Ha \ll 100</math></p> <p><math>0 \ll \phi \ll 0,02</math></p> <p><math>Pr = 6.2</math></p>	<p>Volumes finis.</p>	<p>Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les points suivants :</p> <p>L'application d'un champ magnétique uniforme a montré sur le plan hydrodynamique, un ralentissement de l'écoulement ascendant du nanofluid hybride dans la cavité. Ceci a permis de conclure, qu'augmenter le nombre de Hartmann a des conséquences sur les champs hydrodynamique et thermique. Ainsi, cette augmentation a entraîné d'importants gradients de température et de vitesse près de la paroi active.</p> <p>Les performances thermiques de la cavité se voient améliorées par l'augmentation de l'inertie du fluide ainsi que l'intensification du champ magnétique. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique, à l'exception du cas où <math>Re = 400</math> qui tend à aliéner l'effet de la présence des nanoparticules. Finalement, il y apparaît au travers de cette étude que l'apport des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique, devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.</p>

Auteur	Année	configuration	paramètre	Méthode	observation
<p>Tanzila Hayat, S. Nadeem</p> <p>[16]</p>	<p>2017</p>	 <p>Figure 1: Geometry of the problem</p>	<p><math>\varepsilon = 0 - 0.5 - 0.8</math></p> <p><math>\lambda = 0.2 - 0.5 - 0.9</math></p> <p><math>\delta = -0.3 - 0 - 0.3</math></p> <p><math>R = 0 - 0.5 - 1 - 2 - 3</math></p> <p><math>R_c = 1 - 2 - 3</math></p> <p><math>S_c = 0.5 - 1 - 1.5</math></p>	<p>Volumes finis.</p>	<p>L'hybridité augmente la distribution de la température ainsi que le taux de transfert de chaleur en surface.</p> <p>La limite thermique du «nanofluide hybride (Ag CuO = eau)» augmente en incrémentant le paramètre de génération de chaleur <math>\delta</math>.</p> <p>Il y a une amélioration de la vitesse de transfert de masse à la surface en augmentant le nombre de Schmidt <math>S_c</math> et la réaction chimique <math>R_c</math>.</p> <p>Il y a une augmentation du profil de concentration avec l'augmentation du paramètre de rotation <math>\varepsilon</math> mais cela (<math>\varepsilon</math>) diminue la concentration à la surface.</p>

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>BOUCH OUCHA</b>  <b>Abd el malik.</b></p> <p>[17]</p>	<p>2017</p>	 <p>(a) B=1</p> <p>(b) B=0.75</p>	<p><math>\phi=0\_0.03\_0.05\_0.07\_0,1</math></p> <p><math>Ra=10^3\_10^4\_10^5\_10^6</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p><b>Trois applications ont été considérées :</b></p> <p>Dans la première application, les effets du nombre de Rayleigh, la fraction volumique solide des nanoparticules, la longueur de la source de chaleur, le type de nanofluides, les modèles de viscosité et de conductivité thermique sur les champs d'écoulement et thermique, les nombres de Nusselt local et moyen, et la génération d'entropie, ont été présentés et discutés. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la fraction volumique solide, du nombre de Rayleigh et de la longueur de la source de chaleur entraîne une amélioration du transfert de chaleur. Par contre, la génération d'entropie diminue.</p> <p>Dans la deuxième application, les effets du corps conducteur (ailette), sa position et sa conductivité thermique sur les champs d'écoulement thermique, le nombre de Nusselt moyen, la génération d'entropie, et le nombre de Bejan, ont été présentés et analysés. Ces effets ont montré que le nombre de Nusselt moyen augmente et la génération d'entropie totale diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la longueur du corps conducteur.</p> <p>Dans la troisième application, les effets de l'épaisseur de la paroi inférieure de la cavité carrée sur les champs d'écoulement et thermique, l'entropie locale, l'entropie due au transfert de chaleur et au frottement visqueux, et le nombre de Bejan, ont été investis. Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la paroi inférieure entraîne une</p>

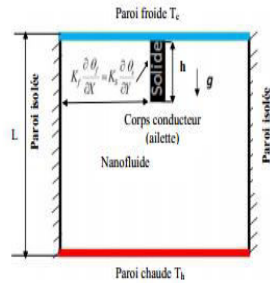


Figure II.2. Schéma représentant un corps conducteur attaché à la paroi supérieure de la cavité carrée et les conditions aux limites.

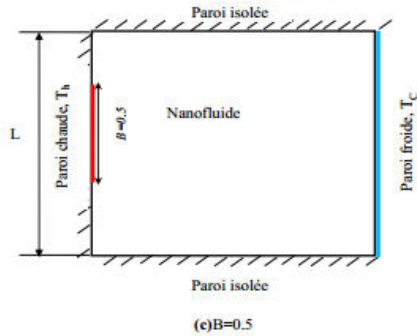


Figure II.1. Suite.

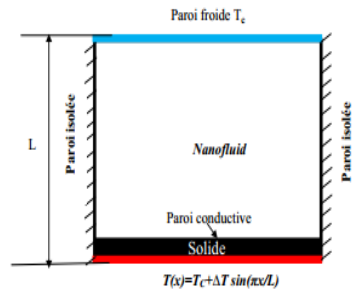


Figure II.3. Schéma représentant le cas d'une paroi inférieure conductrice de la cavité carrée.

diminution du nombre de Nusselt moyen pour tous les cas, et les nanoparticules ont un effet positif sur le transfert de chaleur. La génération d'entropie augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, et diminue également avec l'augmentation de l'épaisseur des parois.

Les principaux résultats obtenus expérimentalement sont les suivants :

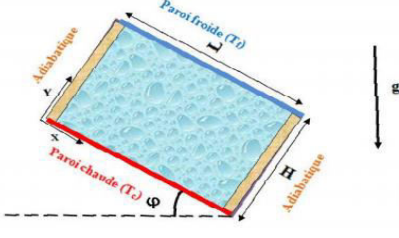
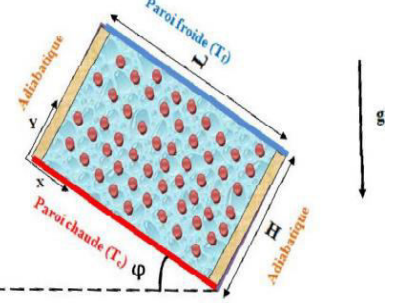
Les comparaisons entre les modèles théoriques trouvés dans la littérature et nos mesures expérimentales de la viscosité et de la conductivité thermique du nanofluide sont en bon accord.

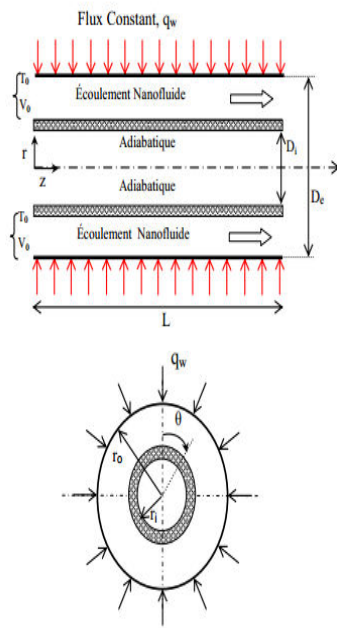
La viscosité dynamique du nanofluide augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ( $Al_2O_3+eau$ ) pour toutes les valeurs de température.

La viscosité dynamique diminue avec l'augmentation de la température.

Le coefficient de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.

Le nombre du Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>BOUHAB EL Bourhane et GUERMAT Zouhir.</b></p> <p>[18]</p>	<p>2018</p>	<p>• Cavity saturée par l'eau pure :</p>  <p>Figure 2.1: géométrie du problème pour cas de l'eau pure</p> <p>• Cavity saturée par un nanofluide :</p>  <p>Figure 2.1: géométrie de problème pour nanofluide</p>	<p><math>Ra = 10^3 - 10^4 - 10^5</math></p> <p><math>\phi = 0 - 0.4</math></p> <p><math>0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ</math></p>	<p>volumes finis</p>	<p>L'augmentation du nombre de Rayleigh nous a permis d'observer que ce dernier influence directement sur la structure de l'écoulement ainsi que sur le transfert de chaleur.</p> <p>L'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise d'avantage de transfert de chaleur.</p> <p>L'effet du nombre de Rayleigh sur le taux d'échange de chaleur a été mise en évidence et le transfert thermique augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.</p> <p>Le transfert thermique en présence des nanoparticules de Cu s'améliore comparativement à celui en présence des nanoparticules de CuO, Al et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour les grandes valeurs de Rayleigh.</p> <p>La valeur de Rayleigh de transition du régime conductif en régime convectif <math>Ra_{c1}</math> et la valeur de Rayleigh débutant la convection thermique oscillatoire <math>Ra_{c2}</math> seront déplacés pour le nanofluide Eau/Cu.</p> <p>L'existence des angles critiques dépendent du Rapport de forme A et du nombre de Rayleigh Ra.</p> <p>Au voisinage de <math>\theta \approx 0^\circ</math>, l'écoulement est multicellulaires pour un rapport de forme supérieur à 1 et monocellulaire pour une cavité carré. En changeant l'inclinaison la structure d'écoulement et dans le cas <math>\theta \approx 180^\circ</math> le fluide est en régime purement conductif. Le taux d'échange de chaleur varie selon la variation de l'inclinaison et le rapport de forme.</p>

Auteur	Année	configuration	paramètre	Méthode	Observation
<p><b>BENKHE DA Mohammed d</b></p> <p>[19]</p>	<p>2018</p>	 <p>Figure II-1 : Schémas représentant des coupes, longitudinale (a) et transversale (b) du conduit annulaire cylindrique</p>	<p><math>Pr=6.2</math></p> <p><math>Re=400-800-1000-1200-1600.</math></p> <p><math>0\% \geq \phi \leq 10\%</math></p> <p><math>Gr=10-5 \times 10^5 - 7.5 \times 10^5 - 10^6</math></p>	<p>Volumes finis.</p>	<p>Les résultats numériques obtenus ont montré une influence de la présence des nanoparticules concernant sa fraction volumique, le type et la forme du nanoparticule, le nombre de Reynolds et le nombre de Grashof ainsi que l'existence des ailettes dans l'espace annulaire sur les caractéristiques des champs thermiques et hydrodynamiques :</p> <p>L'influence de type de nanoparticule donne des écoulements et des champs thermiques qui sont qualitativement similaire mais quantitativement différents. L'utilisation des nanoparticules Ag montre une meilleure amélioration du transfert thermique à cause de sa haute conductivité thermique, puis par Cu, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO et TiO<sub>2</sub> sans oublier qu'il faut considérer la stabilité et la réactivité des nanoparticules avec l'eau fluide de base.</p> <p>Les résultats aussi montrent l'effet de la forme (Lame, Cylindre, Plaquette, Brique et la sphère) et les types (Ag, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO et TiO<sub>2</sub>) des nanoparticules sur le transfert thermique.</p> <p>La convection mixte du nanofluide (Ti<sub>2</sub>O / eau) et son nanofluide hybride (Ti<sub>2</sub>O / Ag eau) pour les paramètres de contrôle géométriques, dynamiques et thermiques considérés. La comparaison des nombres de Nusselt axiaux et moyens ont montré que, pour le même nombre de Grashof et fraction volumique, le nanofluide hybride montre le meilleur transfert de la chaleur par rapport au</p>

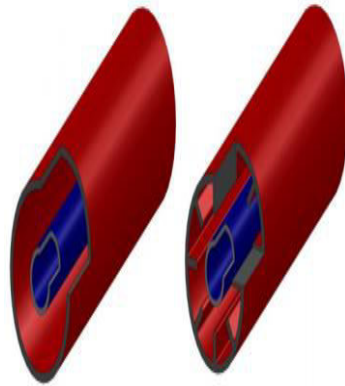


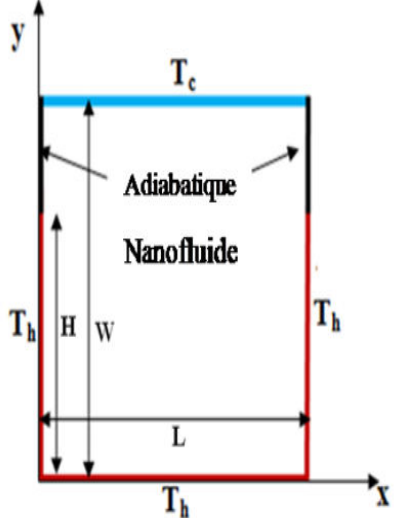
Figure 11-2 : Autre vue du modèle physique avec le cylindre intérieur adiabatique (couleur bleue) et cylindre extérieur chauffé (couleur rouge) : sans ailettes (à gauche), muni d'ailettes longitudinales (à droite)

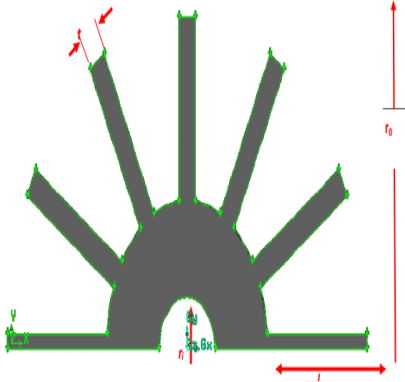
nanofluide.

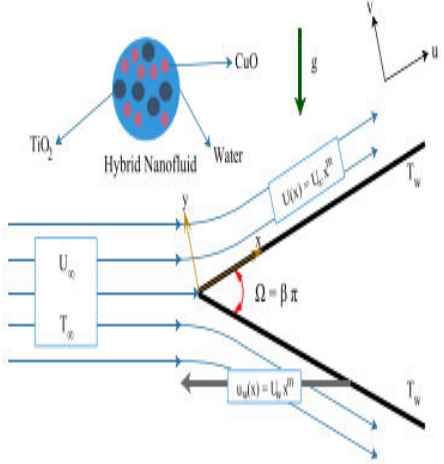
La convection forcée et mixte dans les conduits annulaires horizontaux équipés par des ailettes longitudinales attachées sur le cylindre extérieur le nombre de Reynolds  $Re=400$  et deux nombres de Grashof  $Gr = 0$  et  $Gr = 10^5$ . Deux configurations sont traitées dont les paramètres de contrôle géométriques concernant la hauteur des ailettes. Le nanofluide choisi (Ag/eau) avec une gamme de fraction volumique de 0 à 6%.

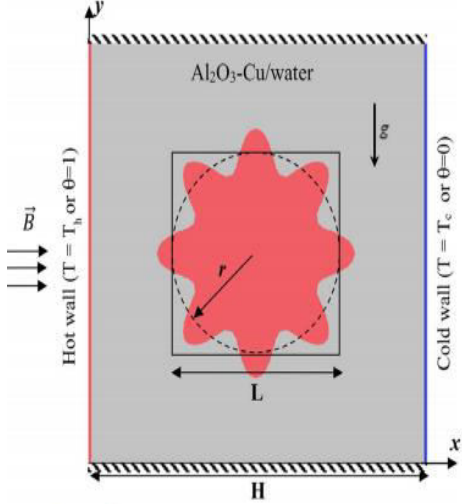
L'existence des ailettes au sein du nanofluide augmente le transfert thermique du mélange du nanofluide, ce qui conduit à changer complètement le profil de vitesse et de la température aussi dans les le cas de  $Gr=0$  et  $Gr = 10^5$ , ce qui cause une augmentation sur le nombre de Nusselt d'une manière remarquable donc une amélioration sur le transfert thermique à travers l'espace annulaire.

L'augmentation de la hauteur de l'ailette augmente aussi le nombre de Nusselt axial et moyen.

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p>BOUDAO UD Warda</p> <p>[20]</p>	<p>2019</p>		<p><math>Ra = 10^2 - 10^4 - 10^6</math></p> <p><math>\phi = 0.0 - 0.3</math></p>	<p>Volumes finis et maxwell Garnetts.</p>	<p>Les nanofluides peuvent améliorer le transfert thermique comparativement aux fluides conventionnels du transfert thermique dus à l'existence des nanoparticules dans les fluides de base.</p> <p>Non seulement l'augmentation de la concentration de volume des nanoparticules provoque des augmentations dans le transfert de chaleur par convection, mais également augmente légèrement les pertes de pression.</p> <p>Les résultats constatent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique.</p> <p>Il n'y a aucune influence de la paroi ondulée sur l'exécution de transfert thermique. Cette remarque est confirmée dans le cas de la génération de l'entropie, où aucun impact de la paroi supérieure ondulée sur l'évolution de la génération de l'entropie, ceci est dû probablement sur l'effet des forces de flottabilité qui sont toujours influencés vers le sens de la gravité.</p> <p>En d'autres termes, la génération de gradient de température et d'entropie due au transfert de chaleur se concentre le long des parois latérales. Pour tous les cas étudiés avec différents nombres de Ra, et différentes valeurs de la fraction volumique.</p>

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p><b>GHADBA E Abdelouah ab.</b></p> <p>[21]</p>	<p>2018- 2019</p>		<p><math>Re=600,</math> <math>900,1200</math> et <math>1500</math></p> <p><math>\phi =0.01-0.1</math></p>	<p>Volumes finis</p>	<p>L'augmentation du nombre de Reynolds a pour effet de diminuer la température du fluide dans l'échangeur de chaleur et le mécanisme de transfert de chaleur par convection naturelle se manifeste pour des nombres de Richardson <math>Ri=15, 27</math> et <math>61</math> c'est-à-dire à faible nombres de Reynolds ainsi la convection mixte ne se manifeste que pour <math>Ri=9.7</math>.</p> <p>L'augmentation des fractions volumiques des nanoparticules de <math>TiO_2</math> dans la base fluide eau a pour effet de diminuer la température du fluide.</p> <p>L'évolution du nombre de Nusselt pour les nombres de Reynolds cités ci-dessus a montré que le taux de transfert de chaleur augmente quand la concentration des nanoparticules augmente ainsi que le nombre de Reynolds.</p>

Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p>Saeed Dinarvand, Mohammadreza nademi Rostami et ioan pop.</p> <p>[22]</p>	<p>2019</p>	 <p>Figure 1. The schematic diagram of the problem and coordinate system.</p>	<p><math>Pr = 6.2</math></p> <p><math>n = 1 - 2 - 5.7</math></p> <p><math>m = -0.0825 - 0 - 0.2 - 1</math></p> <p><math>\lambda = -0.4 - 0</math></p>	<p>Résoudre numériquement par la fonction bvp4c de MATLAB</p>	<p>Le paramètre de loi de puissance de Falkner-Skan (<math>m</math>) et la deuxième masse de nanoparticules (<math>w_2</math>) augmentent le nombre de Nusselt local à la surface du coin.</p> <p>Le nombre de Nusselt local est plus élevé pour déplacer les coins dans la même direction vers le courant libre <math>\lambda &gt; (0)</math> par rapport aux coins statiques <math>\lambda = (0)</math> ainsi que pour déplacer les coins dans la direction opposée au courant libre <math>\lambda &lt; (0)</math>.</p> <p>L'incrément de masse des première et deuxième nanoparticules invoque une amélioration du frottement cutané et du taux de transfert de chaleur local de notre nanofluide hybride.</p> <p>Lorsque la forme de la nanoparticule est sphérique, le nombre de Nusselt local sera minimum que les autres formes de nanoparticules.</p> <p>Le cas HNF4 avec les nanoparticules les plus élevées masse, possède le plus grand taux de transfert de chaleur local entre les autres boîtiers basés sur la masse, ce qui signifie qu'il a de meilleures performances thermiques par rapport au mono-nanofluide et au fluide de base, respectivement.</p>

Auteur	Année	configuration	paramètre	Méthode	observation
<p>Tahar Tayebi Ali J. Chamkha. [23]</p>	<p>2020</p>	 <p>The diagram shows a square cavity of height H and width L. The fluid is Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water. A central porous medium is represented by a red star-shaped region with radius r. The left wall is a hot wall (T = T<sub>h</sub> or θ = 1) and the right wall is a cold wall (T = T<sub>c</sub> or θ = 0). A magnetic field B<sub>1</sub> is applied vertically downwards. The coordinate system (x, y) is shown with the origin at the top-left corner.</p> <p>Fig. 1 Physical model and boundary conditions</p>	<p><math>0 \leq \phi \leq 0.06</math>  <math>10^3 \leq Ra \leq 10^6</math>  <math>0 \leq Ha \leq 50</math>  <math>k^* = 0.1, 0.5, 1.5,</math>                      et 10</p>	<p>volumes finis</p>	<p>L'intensité de la circulation convective augmente principalement avec le nombre de Rayleigh et la diminution de la valeur du Numéro Hartmann.</p> <p>L'intensité du flux augmente également avec la conductivité du bloc solide ondulé et la concentration volumique de nanoparticules.</p> <p>Lorsque la conduction est le mécanisme dominant de transfert de chaleur, l'élévation de la conductivité thermique du bloc améliore le taux de transfert de chaleur, mais une inversion de ce comportement a été observée à un grand nombre de Rayleigh lorsque la convection est forte.</p> <p>Le taux de transfert de chaleur augmente en augmentant le nombre de Rayleigh, la fraction volumique de nanoparticules et rapport de conductivité fluide sur solide alors qu'il diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann.</p> <p>Pour le refroidissement de cette configuration, une application d'un champ magnétique est préférée.</p> <p>Le rôle du champ magnétique est plus visible à de plus grands nombres de Rayleigh lorsque la convection est forte.</p> <p>L'amélioration de la convection naturelle à l'intérieur de ce système par l'ajout de nanoparticules hybrides est plus importante lorsque la convection a lieu.</p>

### I.3. Généralité sur les Nano-fluides

Le développement considérable récent des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible pour certaines applications [21] L'amélioration du transfert de chaleur dans ces systèmes est un sujet essentiel du point de vue des économies d'énergie [1] en introduisant dans un fluide pur une faible concentration de nanoparticules. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de "nanofluides". Ce terme a été introduit par Choi au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale [6]. Récemment, une nouvelle classe de nanofluides, les «nanofluides hybrides», est utilisée pour améliorer encore le taux de transfert de chaleur [16] obtenus en dispersant, dans un fluide base, deux sortes de nanoparticules [15].

#### I.3.1 Définition nanofluides

L'ajout des particules nanométriques dans un fluide de base "appelé nanofluide" [14] [10] Les nanofluides sont des suspensions colloïdales [20]. Le nanofluide est un fluide contenant des particules de taille nanométrique (inférieure à 100 nm) appelées nanoparticules [18], l'ajout des nanoparticules aux fluides de base avec des proportions adéquates (ne dépassant pas 10%) pour éviter l'agrégation [6]. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Les types de nanoparticules sont :

- ✓ **Métalliques** : le cuivre (Cu), l'aluminium (Al), l'or (Au), l'argent (Ag).
- ✓ **Oxydes** : l'oxyde de cuivre (CuO), l'oxyde de l'aluminium ( $Al_2O_3$ ), le de titane ( $TiO_2$ ).
- ✓ **Nanotubes de carbone** [5].

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'agrégations, la sélection d'un telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticules, les solvants les plus utilisés sont [4] [5]:

- ✓ L'eau.
- ✓ L'éthylène glycol, EG.
- ✓ Les huiles.
- ✓ Le Toluène.

### I.3.2. Préparation des nanofluides

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

- 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 distinct :

#### II.2.1 Procédé en une étape (one-step method) [4]:

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.

#### II.2.2 Procédé en deux étapes (two-step method) [4] :

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont disperser dans un fluide de base.

### I.3.3. Applications des nanofluides

- **L'industrie**

L'industrie au sens large (moteur thermique, climatisation, composant de puissance, installation nucléaire, accélérateur de particules, domaine aéronautique ou spatial, etc.), car ça permet de réduire la taille des équipements de refroidissement ou leur consommation électrique puisqu'on gagne en efficacité sans trop se fatiguer. On estime en effet que pour doubler le coefficient d'échange, il faut multiplier la puissance de pompage par 10, ce qui est énorme et non rentable. Un nanofluide permet de s'en affranchir partiellement en améliorant ce coefficient jusqu'à 80% en régime turbulent sans modifier la puissance nécessaire au fonctionnement [6].

- **Refroidissement des systèmes électroniques**

Dans la cavité ouverte, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement, Pour cela plusieurs études ont été effectuées , Hamdi et al [10] Dans le présent travail, l'écoulement des fluides à convection mixte bidimensionnelle et le transfert de chaleur des nanofluides d'eau (Cu, Ag, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub>) dans une cavité entraînée par le couvercle face à deux côtés et partiellement chauffée par le bas ont été étudiés numériquement. Deux sources de chaleur discrètes sont situées sur la paroi inférieure de l'enceinte; cependant, les murs mobiles verticaux et le plafond sont

refroidis à température constante. Les parties limites restantes de la paroi inférieure sont maintenues isolées.

- **Refroidissement des systèmes thermiques**

Utilisées principalement pour le refroidissement des systèmes énergétiques et l'effet du facteur de forme sur le mouvement ascendant des courants fluides [9]. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Bara et col [14], ont présenté des résultats d'une convection naturelle de nanofluides dans une cavité fermée remplie d'eau pure d'une part et d'un mélange d'eau et de nanoparticules (Cu) d'autre part pour un nombre de Rayleigh variant.

- **Refroidissement des systèmes militaires**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermique très élevés ( $q > 500$  à  $1000 \text{ W/cm}^2$ ), où les nanofluides ont montré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance [6].

- **Refroidissement des systèmes nucléaires**

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et de la performance économique des systèmes nucléaires [6]. Boutra et col, [12], ont présenté des résultats issus l'étude numérique de l'écoulement bidimensionnel et plan et du transfert thermique en mode de convection mixte au sein d'une cavité carrée, entièrement remplie d'un nanofluide (Ag-eau). Les suspensions ainsi obtenues peuvent être utilisées dans une multitude d'applications, telles que le refroidissement des réacteurs nucléaires, l'optimisation du transfert thermique au sein d'un échangeur de chaleur, etc...

- **La biomédecine**

Les nanofluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles du traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale. Les

nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance[5].

#### **I.3.4. Autres applications**

Pile à combustible-le chauffage solaire de l'eau-refroidisseurs réfrigérateur domestique, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique [6] et caloducs [4].

#### **I.3.5. Les avantage des nanofluides**

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications[4].

#### **I.3.6. Les inconvénients des nanofluides**

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- Mauvaise caractérisation des suspensions.
- Stabilité des nanoparticules dispersion.
- Chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- Viscosité supérieur, chaleur spécifique Basse.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production [4].

#### **I.3.7.Les propriétés thermophysiques**

##### **I.3.7.1. Nanofluides**

Tout fluide classique possède des propriétés thermophysiques. L'ajout des particules solides de taille nanométriques dans un fluide de base provoque une modification de ses propriétés thermophysiques. L'efficacité du transfert de chaleur à

l'aide du nanofluide est décrite par le coefficient de transfert de chaleur par convection qui est en fonction d'un certain nombre de propriétés thermophysiques, à savoir la conductivité thermique  $k_{nf}$ , la chaleur spécifique  $Cp_{nf}$ , le coefficient de dilatation thermique  $\beta_{nf}$ , la viscosité  $\mu_{nf}$  et la densité  $\rho_{nf}$  [19].

### La fraction volumique

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de tous les autres propriétés se base sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base) [6]. L'augmentation des fractions volumiques résulte une déviation importante pour les isothermes entre le nanofluide et le fluide pur [2]. La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante [5] [6] :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad \text{I.1}$$

$V_p$  : volume des particules solides [ $m^3$ ].

$V_T$  : volume totale [ $m^3$ ].

### Conductivité thermique (K)

La conductivité thermique, notée  $K(W.m^{-1}K^{-1})$ , est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur[21], la conductivité thermique est améliorée de plusieurs dizaines de pourcentage par rapport à celle du fluide de base[9] :

#### A) Modèle de Maxwell

La conductivité thermique effective du nanofluide est approximée par le modèle d'approximation auto-cohérente de Maxwell. Pour l'entité à deux composants de la suspension de particules sphériques [10]. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante [5] :

$$K_{nf} = \frac{Kp + 2Kf + 2\varphi(Kp - Kf)}{Kp + 2Kf - \varphi(Kp - Kf)} Kf \quad \text{I.2}$$

Où  $K_{nf}$ : la conductivité thermique du nanofluide.

$Kf$ : La conductivité thermique du fluide de base.

**K<sub>p</sub>**: La conductivité thermique des particules solides.

Le modèle de Hamilton-Crosser et le modèle de Yu-Choi, qui tiennent compte de la forme non sphérique des nanoparticules [9] :

### B) Modèle de Hamilton & Crosser (1962)

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [17]:

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_p)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + \varphi(K_f - K_p)} K_f \quad \text{I.3}$$

Ou (n) est un facteur de forme empirique donne par :  $n = \frac{3}{\Psi}$ .

n=3 pour les particules sphériques et n=6 pour les particules cylindriques.

Pour ( $\Psi=1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

### C) Modèle de Yu et Choi

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi (2003) [5]. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules[8].

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f - 2(1+\beta)^3(K_f - K_p)\varphi}{K_p + 2K_f + (1+\beta)^3(K_f - K_p)\varphi} \quad \text{I.4}$$

**β**: Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

### Viscosité dynamique (μ)

La viscosité peut être définie comme étant une 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 [4]. La viscosité diminuait fortement avec la température, en particulier pour une concentration élevée de nanoparticules [10].

Les différents modèles de viscosités :

- **Modèle d'Einstein**

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 [17]:

$$\mu_{nf} = \mu_f (2.5\varphi + 1) \quad \mathbf{I.5}$$

Où  $\mu_{nf}$ : La viscosité dynamique du nanofluide.

$\mu_f$ : La viscosité dynamique du fluide de base.

$\varphi$  : la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable pour le cas de particules sphériques et pour de très faible fraction Volumique  $\varphi \leq 0.03$ .

- **Modèle de Brinkman**

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4% [17]. La viscosité du nanofluide est donnée par Brinkman [3] :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_n}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \mathbf{I.6}$$

- **Modèle de Batchelor**

Batchelor a montré que la viscosité est une fonction non linéaire de  $\varphi$  avec la présence d'un terme en  $\varphi^2$ .

$$\mu_{nf} = \mu_f (6.2 \varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \quad \mathbf{I.7}$$

- **Modèle de Maiga et al**

D'autres relations ont été proposées dans la littérature limitée à des applications bien précises. Maiga et al. (2005) à partir de résultats de mesures ont proposé la corrélation [17] :

$$\mu_{nf} = \mu_f (123 \varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad \mathbf{I.8}$$

- **Modèle de Pak et Cho [2] :**

$$\mu_{nf} = \mu_f (533.9 \varphi^2 + 39.11\varphi + 1) \quad \text{I.9}$$

### La masse volumique ( $\rho$ )

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 (1998) [21] :

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

Où :

$\rho_{nf}$  : Masse volumique du nanofluide.

$\rho_s$  : Masse volumique de la nanoparticule.

$\rho_f$  : Masse volumique du fluide.

### La chaleur massique ( $C_p$ ) :

Nous avons retrouvé en suivant les auteurs l'une ou l'autre des deux relations suivantes. De nombreux auteurs dont **Pak et Cho.** (1998) ont utilisé :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi) (C_p)_f + \varphi (C_p)_p \quad \text{I.11}$$

Certains autres dont **Xuan et Roetzel** (2000) ont utilisé :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho C_p)_f + \varphi (\rho C_p)_p \quad \text{I.12}$$

$(C_p)_{nf}$ ,  $(C_p)_f$ ,  $(C_p)_p$  désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules [17].

### Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :

La variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique appelé également coefficient de dilatation isobare [21] :

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad \text{I.13}$$

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique l'expression suivante [4] :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi) \beta_f + \varphi \beta_p \quad \text{I.14}$$

### I.3.7.2. Nanofluides hybrides

Le nanofluide combiné ou hybride est une classe moderne de liquides formée par une combinaison de deux types de nanoparticules en suspension dans des liquides ordinaires. Le choix de ces matériaux nanoparticulaires est assez essentiel [23] [22]. Par exemple, l'Argent (Ag) et l'Oxyde de Titane (TiO<sub>2</sub>) dispersant dans le fluide de base d'une manière homogène et plus stable [19]. Thermophysiques du nanofluide de travail sont supposées constantes, à l'exception de la densité, qui varie en fonction du modèle de Boussinesq. L'équilibre thermique est supposé entre le liquide hôte et les particules nanométriques [23].

La masse volumique du nanofluide hybride ( $\rho_{hmf}$ ), sa capacité calorifique ( $\rho C_p$ )<sub>hmf</sub> ainsi que son coefficient d'expansion thermique ( $\beta$ )<sub>hmf</sub> sont calculés par le biais des lois de mélanges donnés par les équations suivantes [15] [16] :

La masse volumique :

$$\rho_{hmf} = (1 - \varphi_2) [(1 - \varphi_1) \rho_f + \varphi_1 \rho_1] + \rho_2 \varphi_2 \quad \text{I.15}$$

La capacité calorifique :

$$(\rho C_p)_{hmf} = (1 - \varphi_2) [(1 - \varphi_1) (\rho C_p)_f + \varphi_1 (\rho C_p)_1] + (\rho C_p)_2 \varphi_2 \quad \text{I.16}$$

Coefficient d'expansion thermique :

$$(\beta)_{hmf} = [(1 - \varphi) (\rho \beta)_f + \varphi_1 \rho_1 \beta_1 + \varphi_2 \rho_2 \beta_2] / \rho_{hmf} \quad \text{I.17}$$

**La conductivité thermique [22] :**

$$\mathbf{K}_f = \frac{(Khp + 2Kf) - 2\varphi(Kf - Khp)}{(Khp + 2Kf) + \varphi(Kf - Khp)} \cdot \quad \mathbf{K}_{hp} = \frac{\varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2}{\varphi} \quad \text{avec : } \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad \text{I.18}$$

**La viscosité dynamique [22] :**

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi_1)^{2.5}(1-\varphi_2)^{2.5}} \quad \text{I.19}$$

Diffusivité [22] :

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{hnf}}{(\rho C_p)_{hnf}} \cdot \quad \text{I.20}$$

## **I.4. Généralité sur le transfert de chaleur**

### **I.4.1. Introduction**

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps .On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique ou diffusion thermique.
- Le rayonnement thermique.
- La convection.

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques. Cependant, seule la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide[6].

### **I.4.2. Transfert de chaleur par conduction**

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides ou entre corps solides contigus [11], puisque dans les milieux fluides (c'est-à-dire liquide ou gazeux), la conductivité thermique est faible. La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact. Exemple: Barre en métal chauffée à l'une de ces extrémités.

On comprend donc intuitivement que la conduction a une origine microscopique. Il s'agit d'un mécanisme de diffusion de la chaleur. Il correspond au transfert de chaleur dans un solide d'un point chaud vers un point froid. On définit le flux de chaleur élémentaire  $d\Phi$  comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de temps et on écrit [6] :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = - \lambda S \frac{dT}{dx} . \quad \text{I.21}$$

$\Phi$  : Le flux de chaleur en watt (W).

$\lambda$ : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ ).

$\frac{dT}{dx}$  : Gradient de température en ( $\text{K.m}^{-1}$ ).

$dQ$  : La quantité de chaleur élémentaire(J).

dt : est le temps caractéristique élémentaire (s).

### I.4.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre corps, sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace. Cette de transfert de chaleur concerne les longueurs d'ondes comprises entre 100  $\mu\text{m}$  et 0,01  $\mu\text{m}$  et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible [11]. C'est donc le seul mode où la chaleur peut se propager dans le vide .L'équation de Stefan-Boltzmann qui permet de calculer le flux de chaleur transmis par rayonnement est [6]:

$$\Phi(w) = M.S = \sigma .T^4 .S \quad \text{I.22}$$

Sachant que :

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

$\sigma = 5,67.10^{-8}$  est la constante de STEFAN-BOLTZMANN [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{k}^4)$ ].

M : Emittance [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

T : température absolue [k].

S : surface [ $\text{m}^2$ ].

### I.4.4. Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le

mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz [6] [11]. Donnée par la relation dite loi de Newton :

$$\Phi = h \cdot S \cdot \Delta T .$$

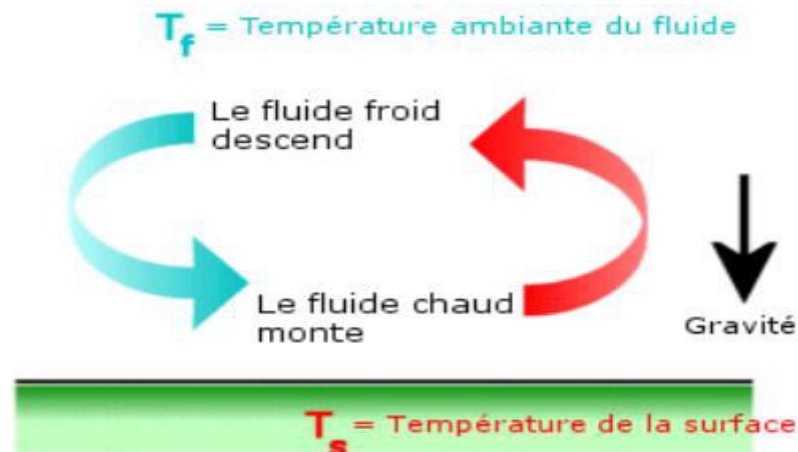
I.23

Avec:  $\Delta T = (T_f - T_p)$

$T_f$  : représente la température du film laminaire de l'écoulement.

$T_p$  : est la température de la paroi du milieu considéré.

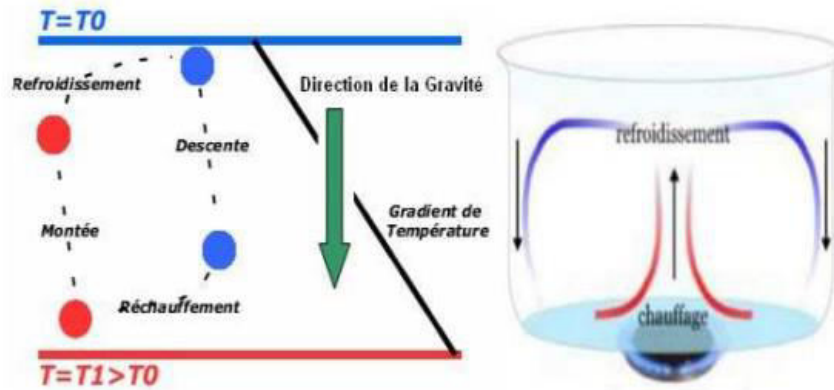
$h$  : le coefficient d'échange convectif [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].



**Figure I.1** : schéma présentatif de transfert convectif [21].

#### I.4.4.1. La convection naturelle

Dans ce type de convection 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 du fluide comme le montre la figure (I.03) [3].



**Figure (I.2) :** Principe physique de la convection naturelle [6].

#### I.4.4.2. La convection forcée

Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc....) ; c'est 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[3].

#### I.4.4.3. La convection mixte

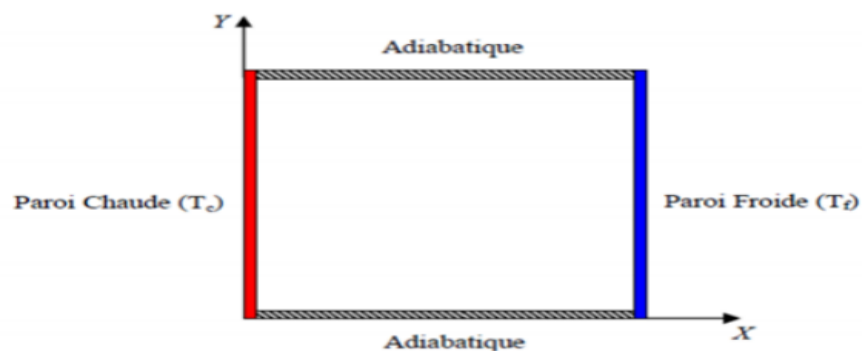
La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur[11]. Le transfert de chaleur par convection mixte et l'écoulement de fluide dans les cavités sont des sujets importants d'investigation en raison de leur effet sur de nombreuses applications d'ingénierie et des phénomènes naturels tels que l'énergie thermique, les industries pétrochimiques, l'aérospatiale, la construction et les capteurs solaires, etc[21]. De plus, les problèmes de convection mixte sont caractérisés par trois paramètres de surveillance non dimensionnels, à savoir Numéro de Reynolds  $Re$ , le numéro de Grashof  $Gr$  et le numéro de Prandtl [10].

#### I.4.5. La convection dans les enceintes

Le phénomène de la convection naturelle des nanofluides dans une enceinte est largement utilisé dans l'ingénierie, comme le collecteur d'énergie solaire, la conservation de la chaleur des circuits de transport thermique, le refroidissement des unités électriques, etc [13].

#### I.4.5.1. Enceinte avec gradient verticale de température

Dans cette configuration, l'une des parois verticales est chauffée tandis que l'autre est refroidie, les parois horizontales étant considérées comme adiabatiques (Figure. I.5). Pour cette configuration, il n'y a pas de gradient critique de température et le fluide est alors ascendant le long de la paroi chaude et descendant le long de la paroi froide [11].



**Figure I.3:** schéma de la convection dans une cavité avec gradient horizontale de température [11].

#### I.4.5.2. Déplacement d'une goutte de fluide

Dans une couche de fluide il y a une goutte située dans le fond, sa densité est plus faible que la densité moyenne, lorsque la poussée d'Archimède est nulle implique que la goutte reste immobile, supposons maintenant une perturbation aléatoire provoquant d'un léger déplacement de la goutte vers le haut, cette dernière est alors entourée de fluide de densité plus grande et de température plus petite [18].

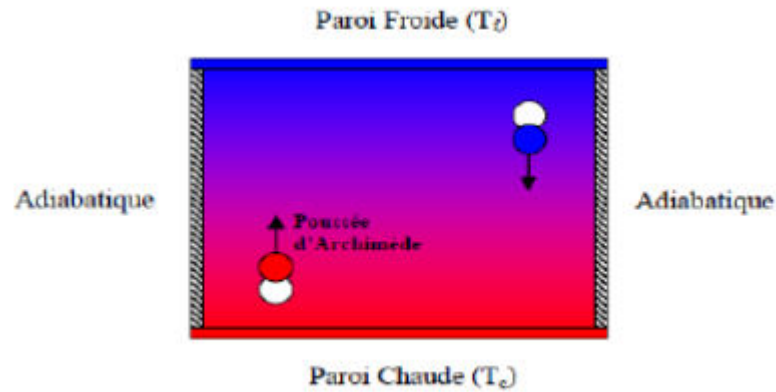


Figure 1.4 : schéma représentant de déplacement d'une goutte de fluide [18].

**I.4.5.3. Trainée visqueuse et diffusion de la chaleur**

On peut supposer que l'existence d'un gradient de température suffit pour entrainer en écoulement convectif. En effet, deux autres facteurs jouent un rôle important pour le mouvement d'une goutte de fluide. Le premier est la trainée visqueuse (force de frottements) dirigée dans le sens opposé au mouvement (fig. 1.7) sa valeur dépend de la viscosité du fluide, lorsque la trainée est égale à la poussée d'Archimède dans ce ca il n'aura pas de mouvement [18].

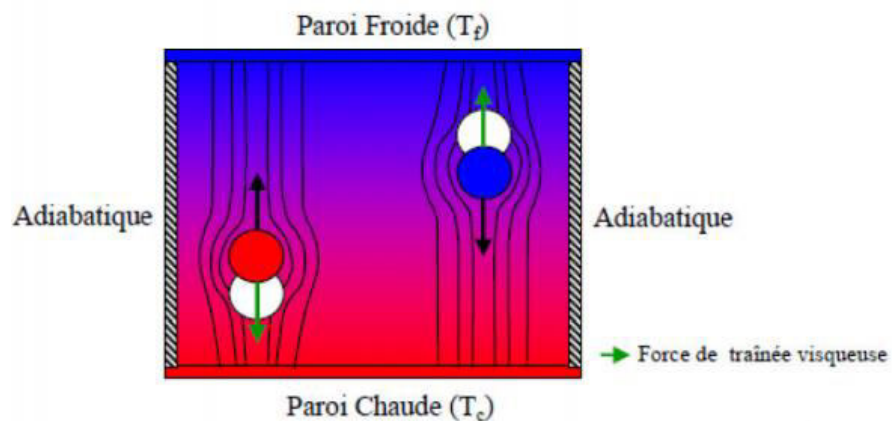
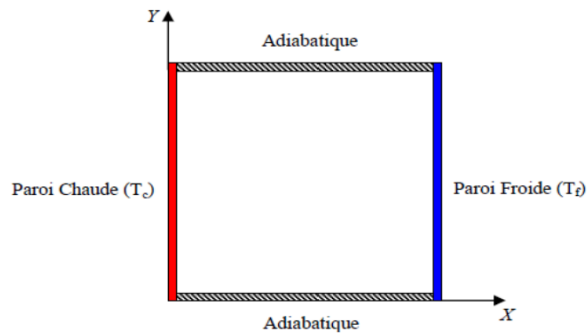


Figure 1.5 : schéma représentant la force e trainée visqueuse [18].

#### I.4.5.4. Enceinte avec gradient horizontale de température

Dans cette configuration, l'une des parois verticales est chauffée tandis que l'autre est refroidie, les parois horizontales étant considérées adiabatique (figure I.8). Pour cette configuration, il n'y a pas de gradient critique de température et le fluide est alors ascendant le long de la paroi chaude et descendante le long de la paroi froide [2].



**Figure I.6:** Schéma de la convection dans une enceinte avec gradient horizontale de température2

# CHAPITRE II

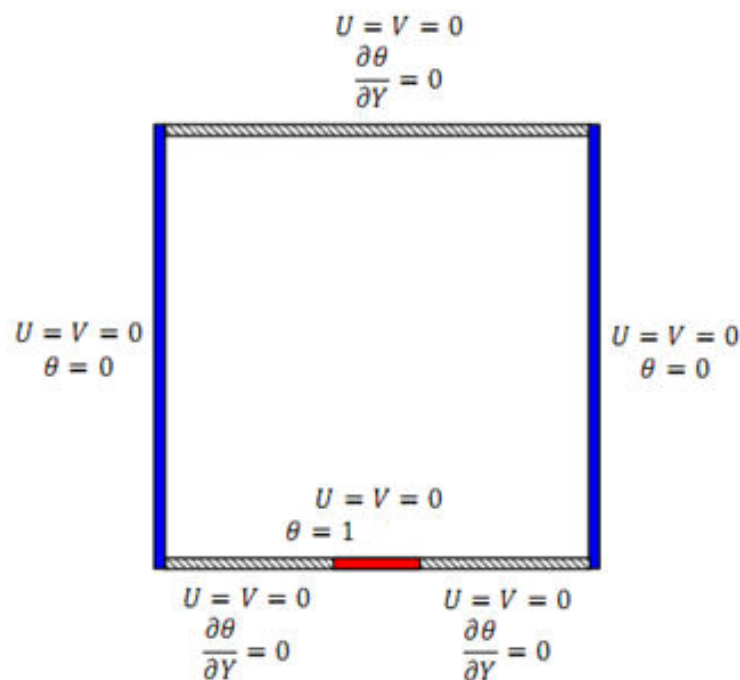
## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées. Chaque phénomène physique est souvent formulé par des équations mathématiques (équations différentielles) qui représentent une modélisation de ce phénomène. Une modélisation doit obligatoirement exprimer le comportement du phénomène dans l'espace et dans le temps. En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation à savoir [11] [5] :

- ✓ Conservation de masse.
- ✓ La quantité de mouvement.
- ✓ Conservation d'énergie.

## II.2. Définition géométrique

La géométrie considérée est représenté sur la Figure (II.1). Elle est basée sur une cavité carrée rempli de nanofluides de longueur (L) chauffée iso-thermiquement par le bas. En effet, 1/3 de la surface de la paroi inférieure est chauffée par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les deux parois verticales latérales sont refroidies et la paroi supérieure est maintenue adiabatique.



**Figure II.1.** Schéma représentant l'enceinte à une source de chaleur localisée au milieu.

### II.3. Equations gouvernantes

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier-stokes et l'équation d'énergie, qui expriment, respectivement, la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Les champs de vitesses et de températures issues de ces équations peuvent être utilisés pour évaluer les paramètres de transfert de chaleur (nombre de Nusselt) et les distributions de l'entropie produite dans la cavité [18].

#### II.3.1. Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante [11] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho.V) = 0 \quad \text{II.1}$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique et  $V$  est le vecteur de vitesse.

#### II.3.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante [5] :

$$\frac{D}{Dt}(\rho.V) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) \quad \text{II.2}$$

Où :  $F$  est une force par unité de volume,  $p$  est la pression et  $\mu$  la viscosité dynamique.

#### II.3.3. Equation de conservation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho.C_p.T) = \Delta(K.T) + q + \beta T \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi \quad \text{II.3}$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho.c_p.T)$  : La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(K.T)$ : La variation d'énergie par conduction.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$ : La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu\phi$ : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients  $C_p$ ,  $k$  et  $\beta$  sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

#### II.4. Les hypothèses simplificatrices:

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, donc on adopte les hypothèses suivantes :

- ✓ L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.
- ✓ Le fluide est Newtonien et incompressible.
- ✓ L'écoulement engendré est laminaire.
- ✓ Le flux de la source de chaleur est constant dans le temps.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ La puissance volumique dissipée est négligeable.
- ✓ Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- ✓ La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température. Cette variation est donnée par la relation :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad \text{II.4}$$

D'où:  $T$ : Représente la température du fluide en un point donné du système.

$T_0$ : La température de référence qui correspond généralement à la valeur moyenne de la température dans le système.

$\rho_0$ : La masse volumique du fluide à la température de référence.

$\beta$ : Le coefficient d'expansion volumique thermique du fluide, il est donné par :

$$\beta = - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad \text{II.5}$$

On utilise une hypothèse simplificatrice connue par l'hypothèse de Boussinesq, qu'elle dit: « la masse volumique ( $\rho$ ) du fluide est supposé constante dans les équations

hydrodynamiques, sauf dans le terme générateur de la convection naturelle ( $\rho.g$ ), ou ses variations induisent directement des forces de poussée d'Archimède.

Toutes les autres caractéristiques thermo-physiques du fluide (la viscosité dynamique  $\mu$ , la conductivité thermique  $k$  et la chaleur massique à pression constante  $C_p$ ) sont considérées comme constantes et définies à la température de référence  $T_0$ .

## II.5. Propriétés thermo-physiques de nanofluide

Dans le tableau II.1 sont présentées les propriétés thermophysiques des liquides et des nanoparticules les plus utilisées dans la littérature des nanofluides.

Propriétés physiques	Eau pure	Cuivre <b>Cu</b>	Argent <b>Ag</b>	Oxyde de Titane <b>TiO<sub>2</sub></b>	Oxyde de Cuivre <b>CuO</b>
$\rho$ (kg .m <sup>-3</sup> )	997.1	8933	10500	4250	6320
$C_p$ (J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	4179	385	235	686.2	531.8
$K$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.613	400	429	8.954	17.65
$\mu$ (Kg .m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.001002	-	-	-	-
$\beta$ (K <sup>-1</sup> ) $\times 10^{-5}$	21	1.67	1.89	0.9	0.85

**Tableau. II.1** : propriétés thermophysiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs.

## II.6. Equations du problème :

On peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans notre étude comme suit :

### II.6.1. Equations de continuité

Après d'application des précédentes hypothèses on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

**II.6**

$u$  et  $v$  étant les composantes du champ de vitesse  $V$  ( $u, v$ ) dans la direction  $x$  et  $y$  respectivement.

### II.6.2. Equations de quantité de mouvement

Les équations de quantité de mouvement s'écrivent de la manière suivante :

**Suivant x :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{II.7}$$

**Suivant y :**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \beta (T - T_0) \quad \text{II.8}$$

### II.6.3. Equations de l'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y comme suit :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{II.9}$$

Les équations différentielles de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie forment le modèle mathématique de l'écoulement de la convection naturelle laminaire [5] [11] [18].

### II.7. Formulation adimensionnelle du problème

Pour adimensionnaliser les variables dépendantes et indépendantes, nous employons des quantités caractéristiques qui sont constantes dans tout le champ d'écoulement et de température. Ces quantités sont : L, V<sub>0</sub>, T<sub>p</sub>, T<sub>f</sub>, et P<sub>0</sub>.

Nous considérons des coordonnées cartésiennes et définissons les variables adimensionnelles suivantes :

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{u}{V_0}, \quad V = \frac{v}{V_0}, \quad \tau = t \frac{V_0}{L}, \quad P = \frac{P - P_0}{\rho V_0^2}, \quad \theta = \frac{(T - T_p)}{(T_f - T_p)}$$

$$x = X \times L, \quad y = Y \times L, \quad u = V_0 \times U, \quad v = V_0 \times V, \quad T - T_p = \Delta T \times \theta, \quad t = \frac{L \times \tau}{V_0}$$

$$P - P_0 = \rho V_0^2 \times P$$

#### II.7.1. Forme adimensionnelle de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial X} \left( \frac{V_0}{L} \right) \quad \text{II.10}$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial Y} \left( \frac{V0}{L} \right) \quad \text{I. 11}$$

Substituant (II.10) et (II.11) dans (II.6) :

$$\frac{\partial U}{\partial X} \left( \frac{V0}{L} \right) + \frac{\partial V}{\partial Y} \left( \frac{V0}{L} \right) = 0$$

Donc :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \text{II. 13}$$

## II.7.2. Forme adimensionnelle des équations de quantité de mouvement

### -L'équation de quantité de mouvement suivant x

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = V0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \left( \frac{V0}{L} \right) = \left( \frac{V0^2}{L} \right) \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad \text{II. 14}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = V0 \times U \left( \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left( V0 \frac{\partial U}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial U}{\partial X} \left( \frac{V0^2}{L} \right) \quad \text{II. 15}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial y} = V0 \times U \left( \frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V0 \times V \left( V0 \frac{\partial U}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial U}{\partial Y} \left( \frac{V0^2}{L} \right) \quad \text{II. 16}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( V0 \frac{\partial U}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} \left( \frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \quad \text{II. 17}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( V0 \frac{\partial U}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left( \frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad \text{II. 18}$$

La substitution de (I-13), (I-14), (I-15), (I-16) et (I-17) dans (I-7) donne :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\vartheta}{V0L} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)$$

Introduisant le nombre de Reynolds  $Re = \frac{V0L}{\vartheta}$  nous obtenons :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad \text{II. 18}$$

**-L'équation de quantité de mouvement suivant y :**

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = V0 \frac{\partial V}{\partial \tau} \left( \frac{V0}{L} \right) = \frac{\partial V}{\partial \tau} \left( \frac{V0^2}{L} \right) \quad \text{II. 19}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} = V0 \times U \left( \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left( V0 \frac{\partial V}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial V}{\partial X} \left( \frac{V0^2}{L} \right) \quad \text{II. 20}$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} = V0 \times V \left( \frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V0 \times V \left( V0 \frac{\partial V}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = V \frac{\partial V}{\partial Y} \left( \frac{V0^2}{L} \right) \quad \text{II. 21}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( V0 \frac{\partial V}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial V}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} = \left( \frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \quad \text{II. 22}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( V0 \frac{\partial V}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left( \frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \quad \text{II. 23}$$

La substitution de (II-19), (II-20), (II-21), (II-22) et (II-23) dans (II-8) donne :

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{v}{V0L} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{g\beta\Delta T}{V0^2} L\theta \quad \text{II. 24}$$

Introduisant les nombres de *Grashof*  $Gr = (g.\beta.\Delta T.L^2)/\nu^2$  mesure le rapport des forces de gravité aux forces de viscosité agissant sur le fluide (il représente l'effet de buoyancy) et de Richardson  $Ri = Gr/Re^2$  l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ri\theta \quad \text{II. 25}$$

### II.7.3. Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} \right) = \left( \Delta T \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \frac{V0}{L} \right) = \left( \frac{V0 \times \Delta T}{L} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad \text{II. 26}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial X} = V0 \times U \left( \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left( \Delta T \frac{\partial \theta}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \left( \frac{V0 \times \Delta T}{L} \right) U \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad \text{II. 27}$$

$$v \frac{\partial T}{\partial y} = V_o \times V \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V_o \times V \left( \Delta T \frac{\partial \theta}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \left( \frac{V_o \times \Delta T}{L} \right) V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad \text{II. 28}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Delta T \frac{\partial \theta}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{\Delta T}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} = \left( \frac{\Delta T}{L^2} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad \text{II. 29}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \Delta T \frac{\partial \theta}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{\Delta T}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left( \frac{\Delta T}{L^2} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad \text{II. 30}$$

Remplaçant par (II-26), (II-27), (II-28), (II-29) et (II-30) dans (II-9):

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha}{V_o L} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad \text{II. 31}$$

Prenant  $Pr = \nu/\alpha$  on aura :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad \text{II. 32}$$

## II.8. Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante. Les conditions de températures sont connues sur les parois.

La température de la paroi gauche et droite est constante et égale à  $T_f$ . La partie chaude de la paroi inférieure est soumise à une température constante  $T_c$ .

La condition adiabatique  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  est adoptée pour les autres parois (supérieure et inférieure).

Ces différentes conditions aux limites sous forme adimensionnelles peuvent être résumées dans le tableau II.2.

Limite	Conditions Hydrodynamiques	Conditions Thermiques
$X=0, X=1$ et $0 < Y < 1$ (Paroi gauche et droite)	$U = V = 0$	$\Theta = 0$
$0 < X < 1$ et $Y = 1$ (Paroi supérieur)	$U = V = 0$	$\frac{d\Theta}{dY} = 0$
$0 < X < \frac{1}{3}, \frac{2}{3} < X < 1$ et $Y=0$ (Parti non chauffé de la paroi inférieur)	$U = V = 0$	$\frac{d\Theta}{dY} = 0$
$\frac{1}{3} \leq X \leq \frac{2}{3}$ et $Y=0$ (Paroi chaude de la paroi inférieur)	$U = V = 0$	$\Theta = 1$

**Tableau II.2 :** conditions aux limites hydrodynamique et thermiques sous forme adimensionnelles.

## II.9. Les nombres sans dimension

### II.9.1. 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 :

$$\frac{f\alpha}{f\mu} = \frac{\text{force d'entrie}}{\text{force de viscosité}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu L V} = \frac{\rho L V}{\mu} = \text{Re} \quad \text{II.33}$$

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 générale turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires.

### II.9.2. Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport entre le diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux.

Il peut être exprimé comme :

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{II.34}$$

### II.9.3. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof est proportionnel au rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuses. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\text{force de gravité}}{\text{force de viscosité}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho}{\mu^2} = \text{Gr} \quad \text{II.35}$$

Où  $g$ : L'accélération de la pesanteur [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

$\Delta T$  : La différence de température [ $^\circ\text{C}$ ].

### II.9.4. Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la traînée visqueuse par le taux de diffusion thermique.

Il peut être exprimé comme [11] :

$$\text{Ra} = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_\infty) L^3 = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad \text{II.36}$$

Où  $T_s$  : La température de la paroi [ $^\circ\text{C}$ ].

$T_\infty$  : La température du fluide loin de la paroi [ $^\circ\text{C}$ ].

$\nu$ : La viscosité cinématique =  $\frac{\mu}{\rho}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$\alpha$  : La diffusivité thermique =  $\frac{K}{\rho c}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

### II.9.5. Le nombre de Nusselt

En convection, le phénomène de transfert de chaleur à la surface est évalué et caractérisé par le nombre adimensionnel est le nombre de Nusselt, qu'il désigne le rapport

entre les quantités de chaleur échangées par convection et par la conduction pure. Cette grandeur situe donc l'importance du flux thermique échangé par convection à la paroi du flux équivalent transmis par seule conduction (en l'absence tout mouvement du fluide), sous l'effet de même écart de température [11] [5]. Le nombre de Nusselt (Nu) est un rapport de la convection à la conduction pure.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flux convectif} = h \cdot \Delta T \\ \text{Flux conductif} = K \cdot \Delta T / L \end{array} \right. \quad \frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} = \frac{h \cdot \Delta T}{K \cdot \Delta T / L} = \frac{h \cdot L}{K} = \text{Nu} \quad \text{II.37}$$

Par conséquent, le nombre de Nusselt représente le perfectionnement du transfert de chaleur dans la couche de fluide comme étant le rapport des deux phénomènes. Si la valeur de Nu est grande cela veut dire que la convection est dominante. Si Nu = 1, cela veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction pure [11].

Où h: Le coefficient de transfert par convection [ $W \cdot m^{-2} \cdot K$ ].

## II.10. Modèle Numérique

De nombreuses méthodes numériques existent pour la résolution des types d'équations différentielles, on peut citer à titre d'exemples: [17]

- 1- La méthode des différences finis
- 2- La méthode des éléments finis
- 3- La méthode des volumes finis

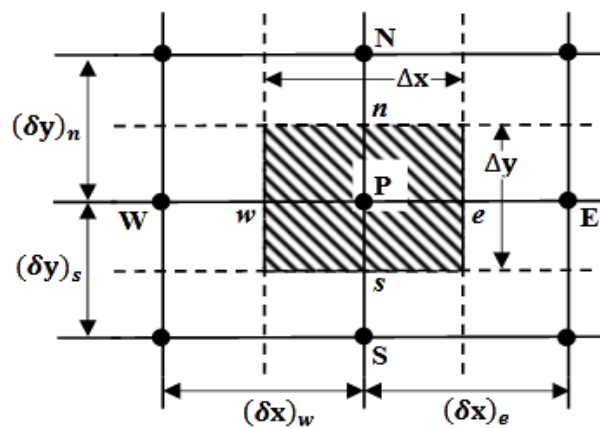
Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique moyennant le code de calcul « FLUENT 6.3.26 », qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel « GAMBIT 2.4.6 » [5].

### II.10.1. Procédure Numérique :

Afin de résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles établies dans le chapitre précédent, nous allons procéder à leurs discrétisations dans le but d'obtenir un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer les champs de

toutes les variables du problème considéré. La méthode de volumes finis a été adoptée pour accomplir cette discrétisation, et l'utilisation de l'algorithme SIMPLE pour la correction de pression sur un maillage non uniforme. La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar le principe de méthode des volumes finis baser sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle, Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal, comme indiqué dans la Figure II.1. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. Les différentes étapes de la méthode des volumes finis sont :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle.
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles.
- Écriture des équations algébriques aux nœuds du maillage.
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.



**Figure II.1:** Volume de contrôle bidimensionnel.

Le volume de contrôle est montré par la Figure II.1, Pour un nœud principal  $P$ , 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  $P$  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  $y$ .

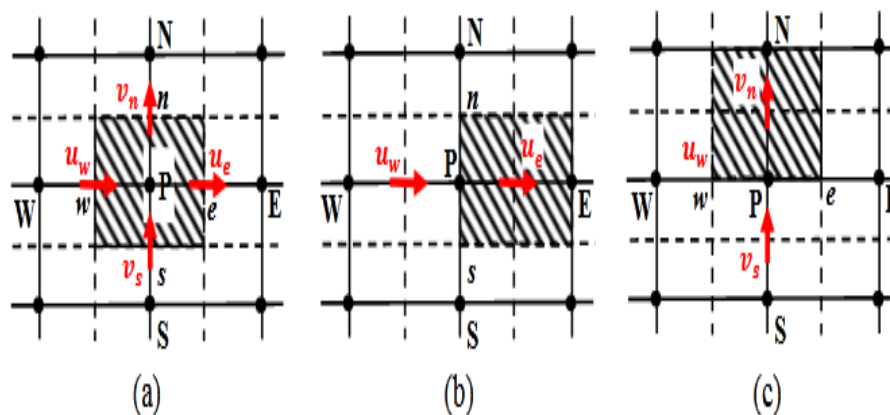
Dans cette mémoire la résolution de problème est effectuée par le logiciel FLUENT, basé sur la méthode des volumes finis, utilisant le schéma QUICK pour la discrétisation de l'équation de quantité de mouvement et la discrétisation de l'équation d'énergie.

### II.11. Maillage

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud, où on trouve la variable  $P$  et les composantes  $u$  et  $v$  de la vectrice qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points (nœuds).

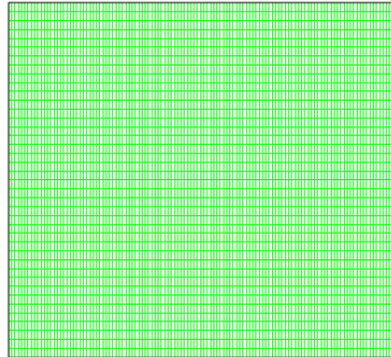
Ainsi, un élément de volume de contrôle est défini autour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires pression et température sont stockées dans le nœud  $P$  du maillage (Figure II.2 (a)), tandis que les grandeurs vectorielles  $u$  et  $v$  sont stockés aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de vitesse.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale  $u$  est décalé suivant la direction  $x$  par rapport au volume de contrôle principale (Figure II.2 (b)), celui de la composante transversale  $v$  est décalé suivant la direction de  $y$  (Figure II.2 (c)). Ce type de maillage dit "maillage décalé" permet une bonne approximation des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression ainsi qu'une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans Figure II.2.



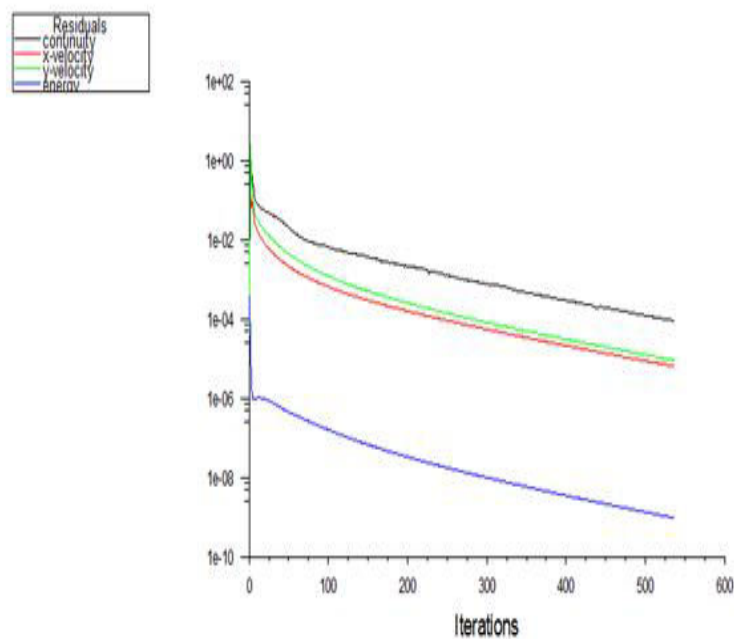
**Figure II.2 :** Schéma du maillage

La figure (II.3) montre la grille utilisée sur le mailleur GAMBIT. Les équations de continuité, de quantité du mouvement bidimensionnelle et d'énergie sont résolues numériquement en utilisant le solveur Fluent.



**Figure II.3:**Le maillage utilisé.

La convergence atteinte pour un nombre d'itération environ 550 itérations Avec une erreur d'ordre  $10^{-6}$  (figure II.4).



**Figure III.A.4:** Evolution de résidu.

## II.12. Présentation des logiciels Gambit et Fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

**II.12.1. GAMBIT :**

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

**II.12.2. FLUENT**

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales
- Des mailles (hybrides) mixtes.

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (par exemple allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures. Ainsi, à titre non exhaustif, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes:

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

- Ecoulements en milieu poreux.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "Fluent" passe par les étapes suivantes:

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les connues telles que : vitesses, pressions et températures.

Le choix entre ces modèles se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies. Il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats par rapport à un autre, mais ceci est dû principalement à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites.

# CHAPITRE III

### III.1. Introduction

Dans ce parti nous allons nous intéresser à l'étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans la géométrie considérée. Nous verrons en premier lieu, l'influence du maillage sur les résultats. Puis nous procédons à la validation des résultats de la simulation obtenus à l'aide du logiciel FLUENT en comparant avec ceux obtenus par d'autres auteurs. Alors pour plus de clarté, nous avons jugé utile de présenter les résultats selon le mode de la source de chaleur : source de chaleur avec température constant.

Une simulation numérique de l'écoulement laminaire stationnaire par convection libre dans une cavité bidimensionnelle remplie de différents nanofluides (nanofluides et nanofluides hybride) a été réalisée. La cavité carrée est chauffée isothermiquement par le bas. En effet, 1/3 de la surface de la paroi inférieure est chauffée par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les deux parois verticales latérales sont refroidies et la paroi supérieure est maintenue adiabatique. Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance (Power-Low). Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de fluide purs l'eau, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu) et nanoparticule hybride(Ag- CuO), pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^5$ , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.0, 0.02, 0.04, 0.2 et 0.4) . Pour examiner profondément les effets des paramètres pertinents sur l'écoulement hydrodynamique et le transfert de chaleur dans notre configuration, nous allons subdiviser cette étude en deux parties principales :

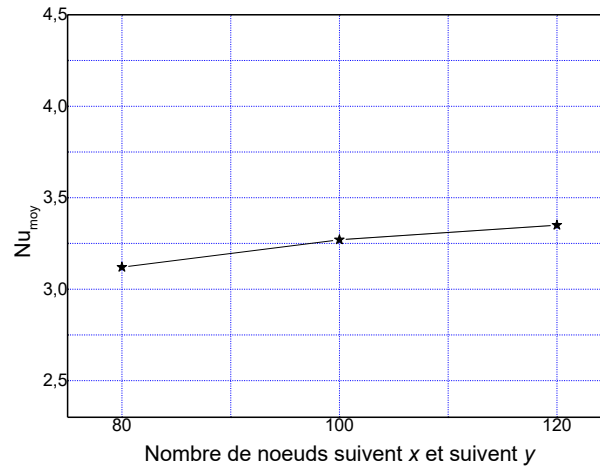
- Effet de concentration des nanoparticules.
- Effet de types des nanoparticules.

Nous présentons dans ces études les isothermes et les lignes de courant, ainsi nous avons affiché les profils de température au plan médium. Nous terminons par une étude relative au transfert thermique en considérant le nombre du Nusselt local et moyen avec différentes fractions volumiques.

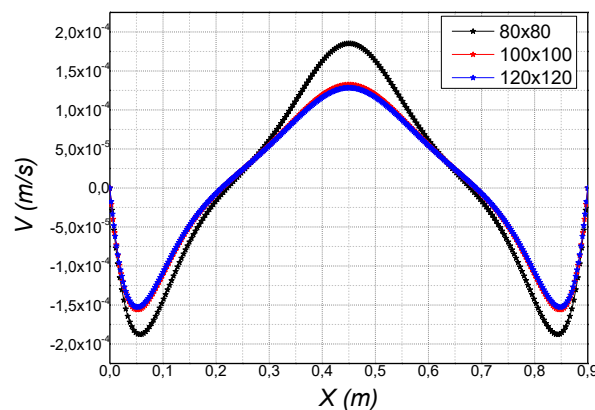
### III.2. Choix du maillage

L'influence de la taille et du nombre des nœuds sur la solution exprimée par le transfert thermique à la partie active « chauffée » est illustrée sur la figure III.1 et le profil de vitesse au plan médium sur la figure III.2 Une répartition irrégulière « suite géométrique » des nœuds est utilisée pour résoudre plus précisément les phénomènes physiques

présents notamment en régime de couche limite caractérisée par l'existence de forts gradients dans les zones pariétales. Le profil de vitesse devient insensible au nombre de nœuds à partir de la grille  $100 \times 100$ , et le nombre de Nusselt moyen devient constant.



**Figure III.1:** Convergence du nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée pour  $Ra=10^3$ .

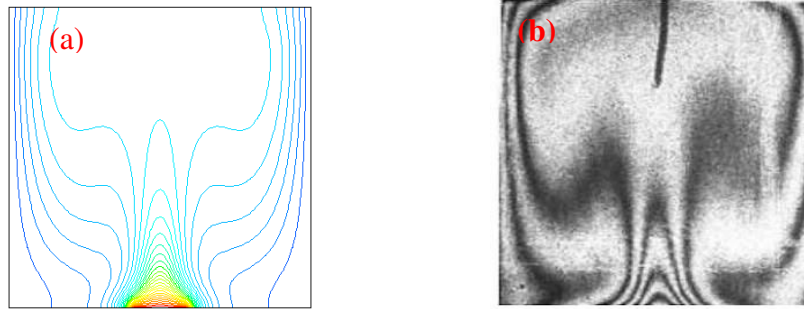


**Figure III.2:** Profil de vitesse le long de  $y=0.5$  pour  $Ra=10^3$ .

### III.3. Validation des résultats

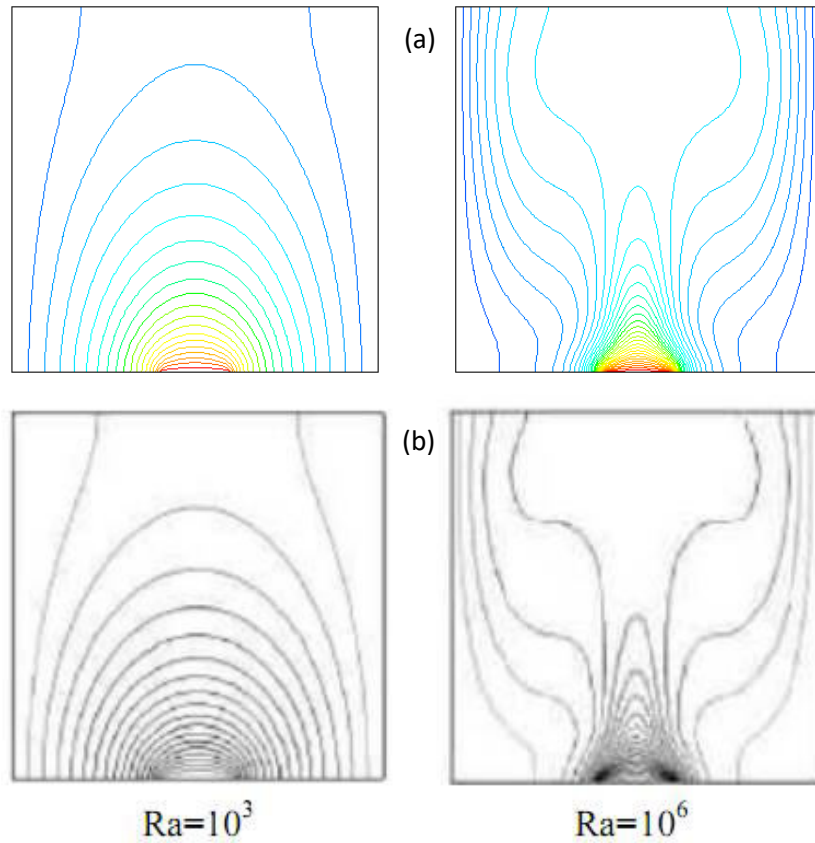
De manière à vérifier l'exactitude des résultats numériques obtenus dans le présent travail avec le code FLUENT, une validation de notre simulation numérique a été faite en comparant avec les études numériques et expérimentales de Calcagni et al [24] qui sont disponibles dans la littérature. Pour cela on a gardé les mêmes conditions que [24] : le fluide en convection est l'air dans une géométrie carrée avec une source de

chaleur localisée au centre de la paroi horizontale inférieure. On a aussi utilisé les mêmes nombres de Rayleigh ( $Ra^a$ ) dans [24].



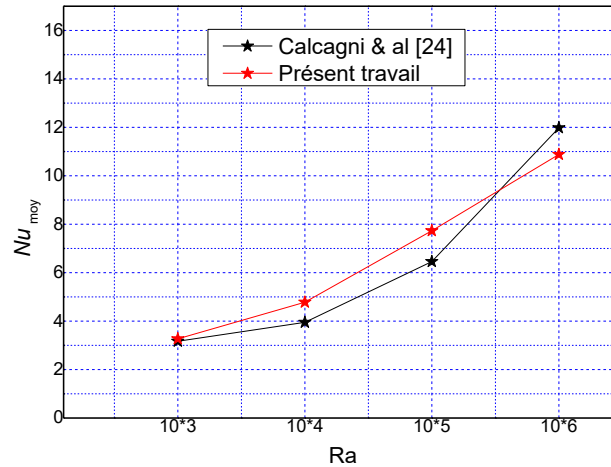
**Figure III.3:** Comparaison des isothermes,  $Ra = 10^5$ .

(a) Présent travail (b) Résultats Expérimentaux de Calcagni et al [24].



**Figure III.B.4:** Comparaison des isothermes.

(a) Présent travail (b) Résultats numériques de Calcagni et autres [24].



**Figure III.5:** Comparaison de la variation du Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude.

La comparaison a été faite en considérant la variation du nombre de Rayleigh (Ra). La comparaison des isothermes avec les données expérimentales (figure III.3), et les résultats numériques (figure III.4) et la comparaison de la variation du Nusselt moyen en fonction de Ra (figure III.5) montrent une excellente concordance. Ceci permet donc de valider notre procédure de simulation numérique.

### III.4. Discussion des résultats

#### III.4.1. Effet de concentration des nanoparticules

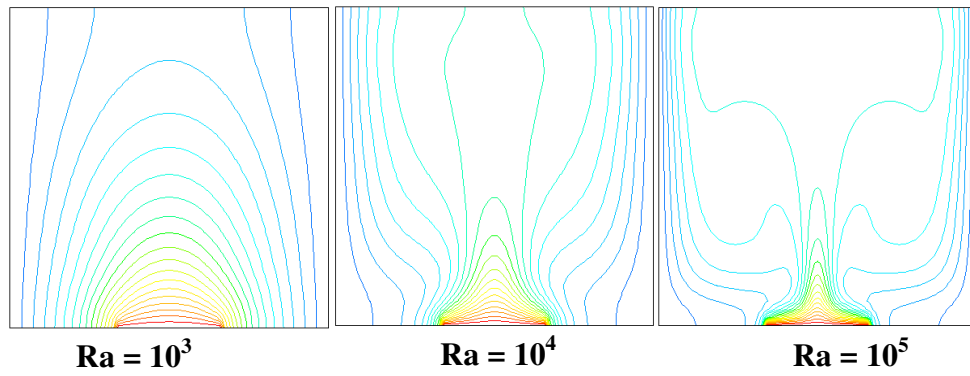
- **Champ thermique**

Ce champ est représenté par les contours des températures des figures (III.6, III.7 et III.8) pour un nombre de Rayleigh qui varie dans l'intervalle  $10^3$ - $10^5$ , on remarque que la chaleur récupérée de la source chaude est transportée par convection vers le haut au milieu de l'enceinte par la paire de cellules au centre. C'est ce qui explique les températures relativement élevées dans la partie centrale de l'enceinte, La chaleur est évacuée de façon équitable à travers les deux parois latérales. La figure montre aussi que les isothermes changent surtout en fonction de Ra. Dans le cas de  $Ra = 10^3$ , les isothermes deviennent presque des ellipses concentriques et ont une structure symétrique par rapport au plan vertical passant par  $x=1/2$ , quel que soit la valeur du nombre de Rayleigh, cependant, elles affichent des comportements différents lorsque le nombre de Rayleigh augmente. Pour les cas  $Ra = 10^3$

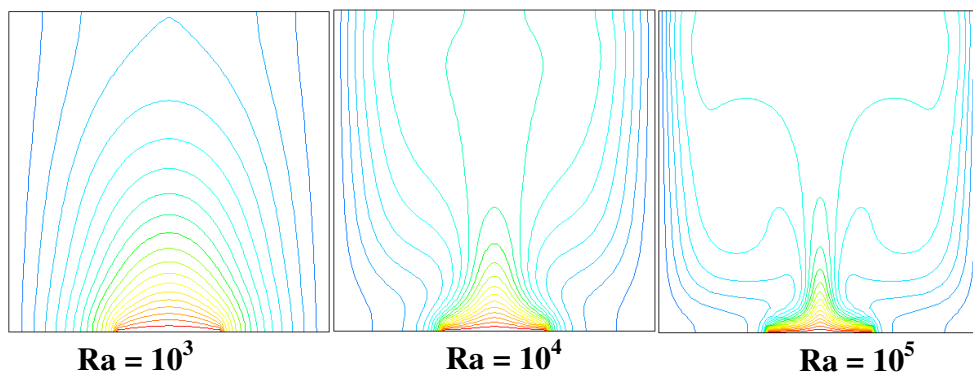
et 104, où la conduction domine le régime d'écoulement, les isothermes sont distribuées à proximité de la paroi chaude. En outre, dans ces figures, les isothermes sont affectées par la présence de nanoparticules. En fait, l'existence de nanoparticules provoque une accumulation des isothermes près de la paroi chaude ce qui signifie une amélioration du taux de transfert de chaleur ce qui est indiqué par l'augmentation du nombre de Nusselt.

Lorsque  $Ra = 10^4$ , la déformation des isothermes augmente. Lorsque  $Ra = 10^5$ , les couches limites thermiques deviennent plus minces et les isothermes deviennent stratifiées. Si on compare les isothermes dans les figures pour différentes valeurs de  $Ra$ , on peut noter que lorsque le  $Ra$  augmente, les isothermes se rapprochent les unes des autres dans la zone située près du mur inférieur chauffé c.-à-d. que les gradients de la température deviennent plus élevés à proximité de la paroi inférieure chauffée. Ceci implique une augmentation du transfert thermique à travers la paroi inférieure de l'enceinte pour un plus haut nombre de  $Ra$ . Donc on peut dire que les températures les plus élevées sont celles du fluide qui circule parallèlement à la paroi chauffée, tandis que les températures les plus basses sont celles du fluide qui circule parallèlement aux parois froides. Ainsi le fluide s'échauffe en contact de la région chauffée, se refroidit en contact des parois froides.

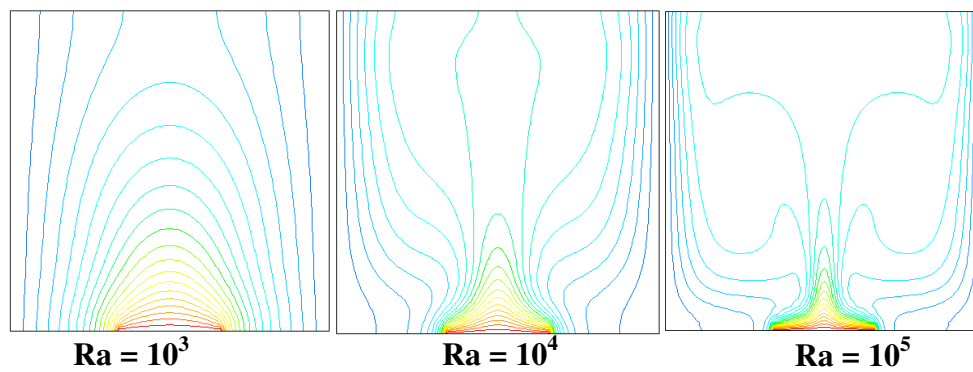
Pour plus de justification concernant la distribution de la température dans l'enceinte, la figure III.B.9 montre les profils de température le long du  $y = 0.5$ , où nous constatons des valeurs comprises entre une valeur maximale correspondante à la température au milieu de l'enceinte et une faible valeur correspondante à l'extrémité de l'enceinte. On remarque que pour  $Ra = 10^3$  et  $Ra = 10^4$ , la valeur maximale de température au milieu de l'enceinte augmente avec l'augmentation de  $Ra$ , et pour  $Ra > 10^4$  la valeur maximale de température au milieu de l'enceinte diminue avec l'augmentation de  $Ra$ . Cette diminution de la température maximale est une conséquence de l'amélioration du processus de dégagement de la chaleur grâce à l'ajout de nanoparticules ayant une conductivité thermique supérieure à celle du fluide de base.



Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,0$

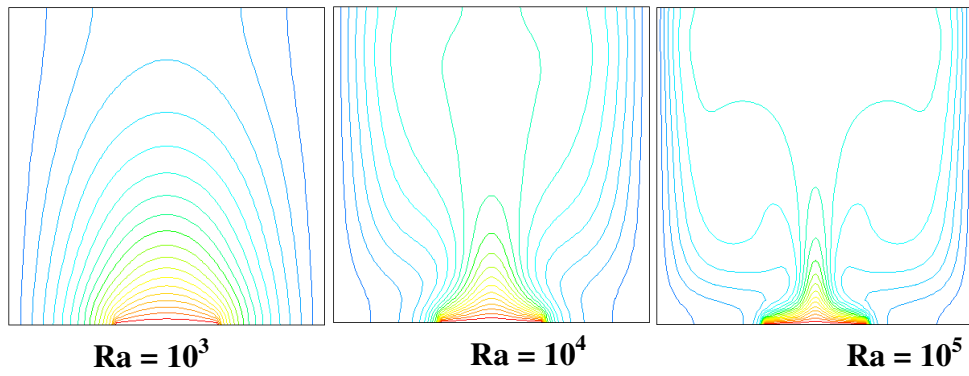


Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,02$

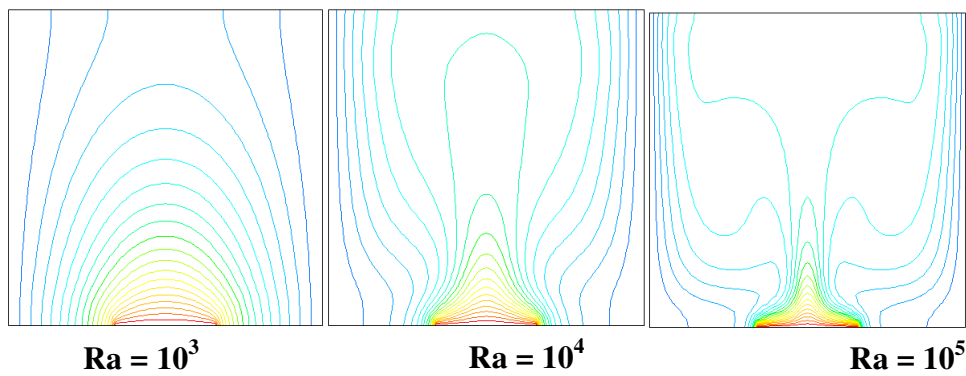


Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,04$

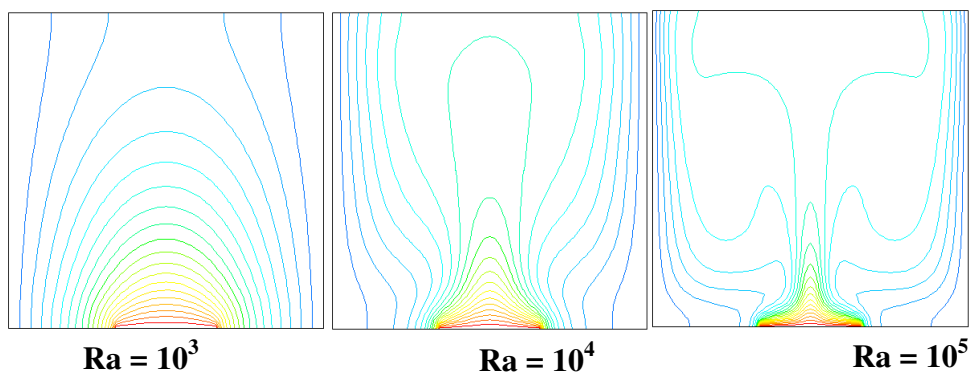
**Figure III.6:** Les contours des Isothermes du (Cu-eau), pour différentes concentrations.



Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,0$

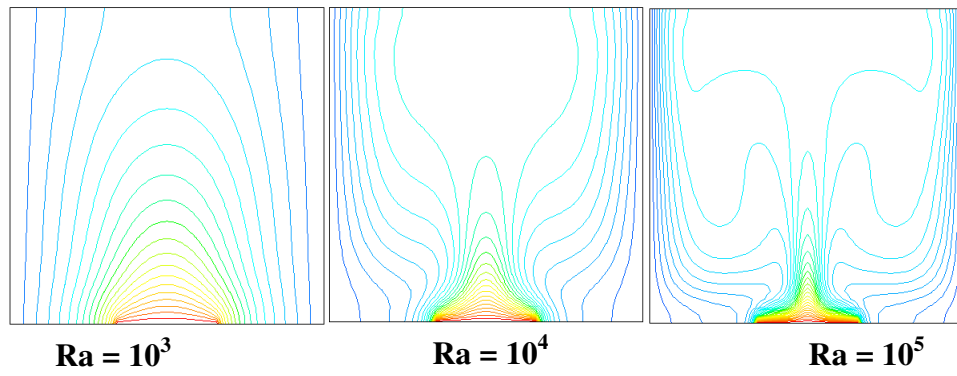
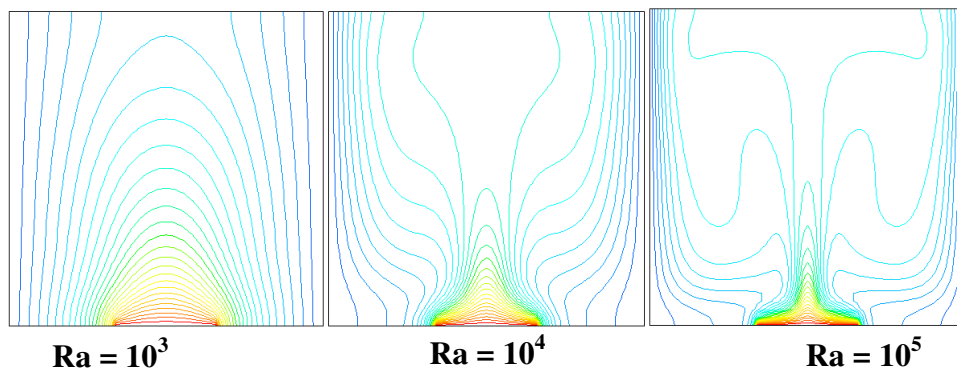
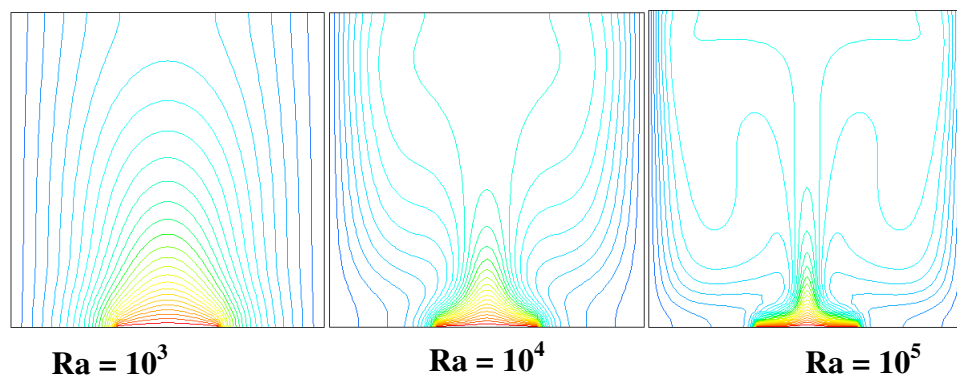


Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,02$



Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,04$

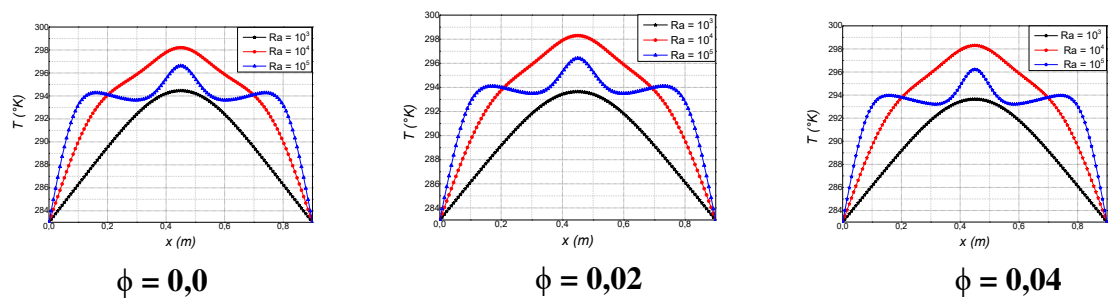
**Figure III.B.7:** Les contours des Isothermes du (Ag-eau) pour différentes concentrations.

Nanofluide hybride (Ag– Cuo / Eau),  $\phi = 0,02$ Nanofluide hybride (Ag - Cuo / Eau),  $\phi = 0,2$ Nanofluide hybride (Ag - Cuo / Eau),  $\phi = 0,4$ 

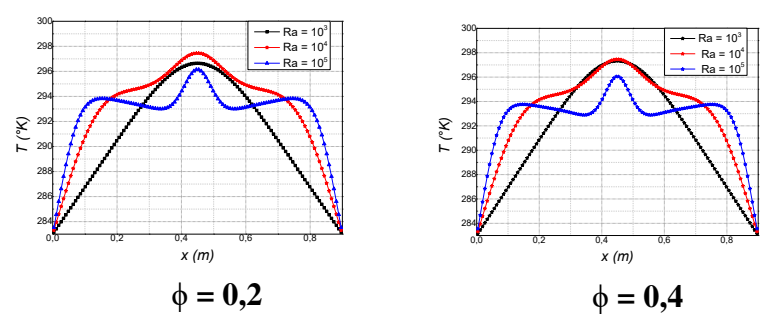
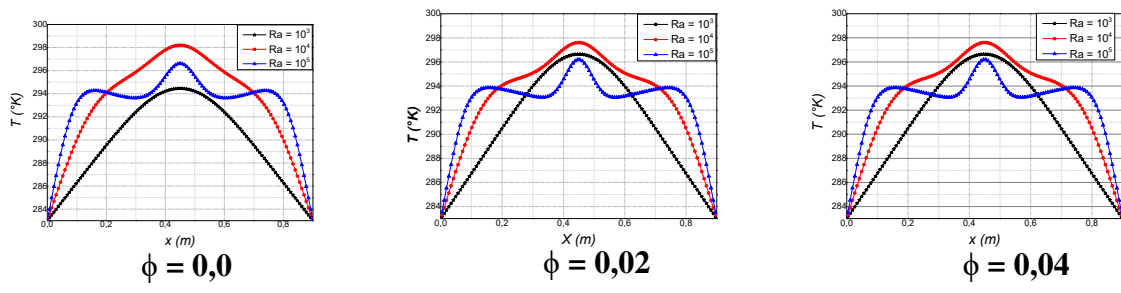
**Figure III.B.8:** Les contours des Isothermes du (Ag – Cuo / eau), pour différentes concentrations.



**Nanofluid (Cu / Eau)**



**Nanofluid (Ag / Eau)**



**Nanofluid hybrid (Ag - CuO / Eau)**

**Figure III.B.8:** Profil de la température le long de la section médiane de l'enceinte ( $y = 0.5$ ) pour différents Nanofluides.

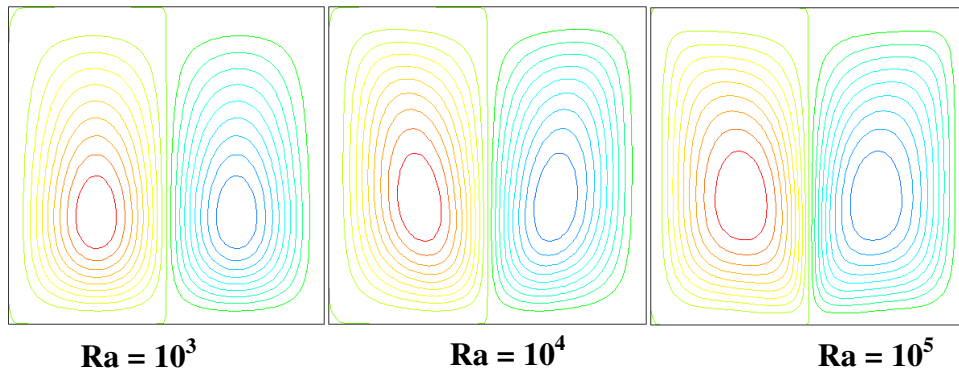
- **Champ dynamique**

Ce champ est représenté par les contours des lignes de courant dans les figures (III.10, III.11 et III.12), pour un nombre de Rayleigh qui varie entre  $10^3$  et  $10^5$  dans une enceinte remplie d'eau avec des fractions volumiques entre 0 et 0,4 de nanoparticules. On remarque la formation de deux cellules contrarotatives dont l'une tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et la deuxième tourne dans le sens contraire. Cette solution présente un écoulement symétrique montrant la formation de deux vortex contrarotatifs pour toutes les valeurs du nombre de Rayleigh. En fait, les forces dynamiques générées en raison des différences de température du fluide forcent le liquide à se lever au milieu et à descendre sur les parois froides de l'enceinte. Ce mouvement du fluide constitue deux cellules contrarotatives identiques circulant dans l'enceinte car les conditions aux limites sont symétriques.

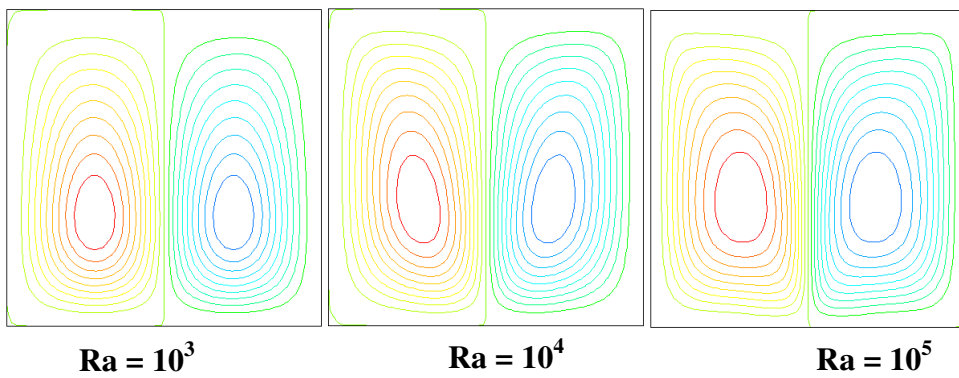
On remarque aussi avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, l'intensité de la recirculation à l'intérieur de l'enceinte augmente et les centres des lignes de courant se déplacent vers le haut. Il est observé que, même si la forme des cellules ne change pas avec le nombre de Ra, leur intensité augmente par l'addition des nanoparticules.

Pour plus de détails la variation du nombre de Nusselt local le long de la partie chauffée est représentée dans la figure (III.13). Il est évident que la valeur minimale du nombre de Nusselt local est située au milieu de la partie chauffée, tandis qu'il prend sa valeur maximale aux extrémités de celle-ci. On remarque que les courbes du nombre de Nusselt local à  $Ra=10^3$  sont presque identiques avec les courbes des nombres de Nusselt local à  $Ra=10^4$ .

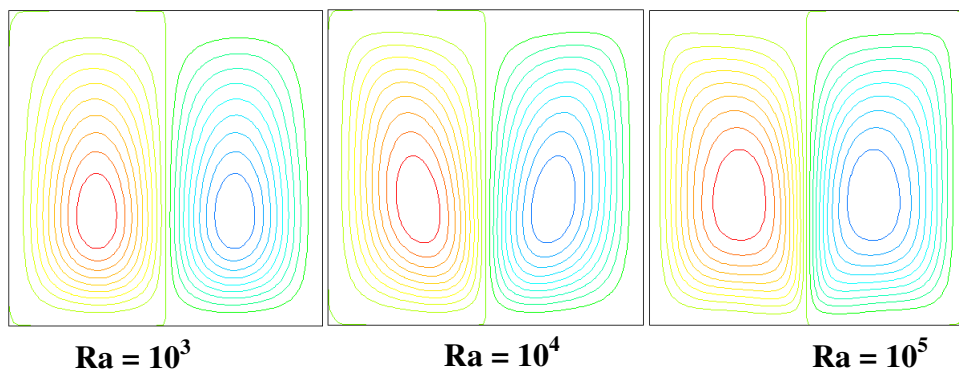
La figure (III.14) montre la variation de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules de Cu, Ag et nanoparticules hybride Ag-Cuo. Il est clair que lorsque le nombre de Ra augmente, le nombre moyen de Nusselt augmente. Ceci est prévu parce que si le niveau de température au-dessous du mur augmente, menant à une amplification du coefficient de transfert thermique, qui est inversement proportionnel à la température du mur. Cette augmentation est plus considérable pour les nombres de Ra les plus élevés où la convection est le mode de transfert de chaleur dominant. On remarque aussi que les valeurs du Nusselt moyen pour le nanofluide et nanofluide hybride sont plus élevées par rapport à celles de l'eau pure. Ceci est dû à l'augmentation de la conductivité du nanofluide par rapport à celle de l'eau pure, ce qui augmente le transfert thermique par diffusion (conduction) à travers la paroi inférieure.



Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,0$

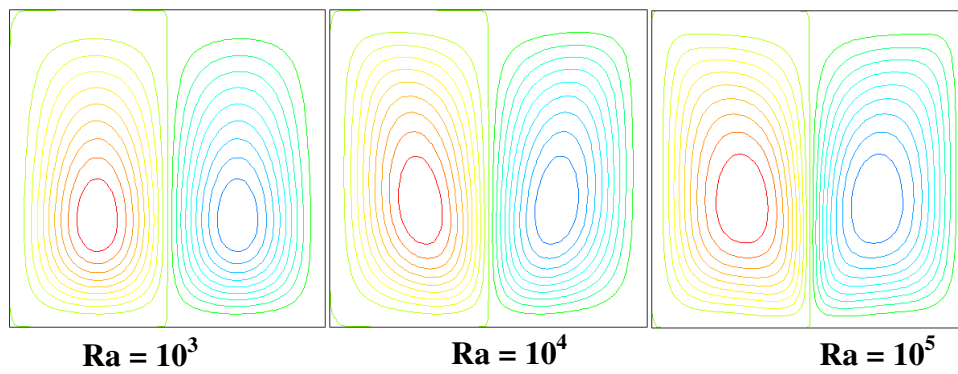


Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,02$

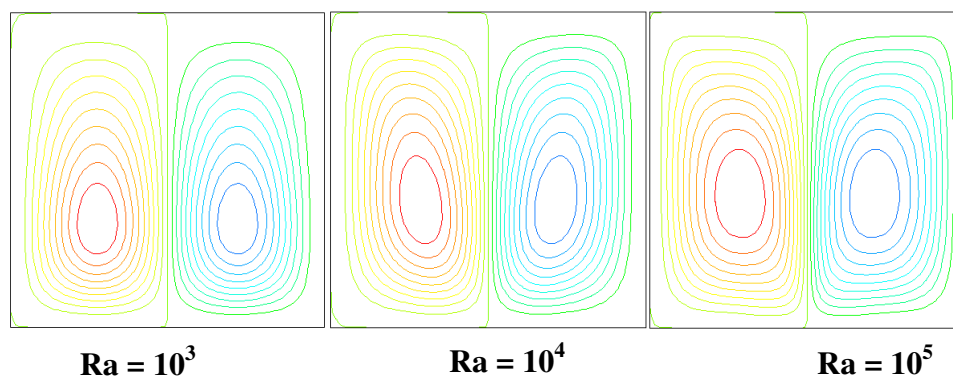


Nanofluide (Cu / Eau),  $\phi = 0,04$

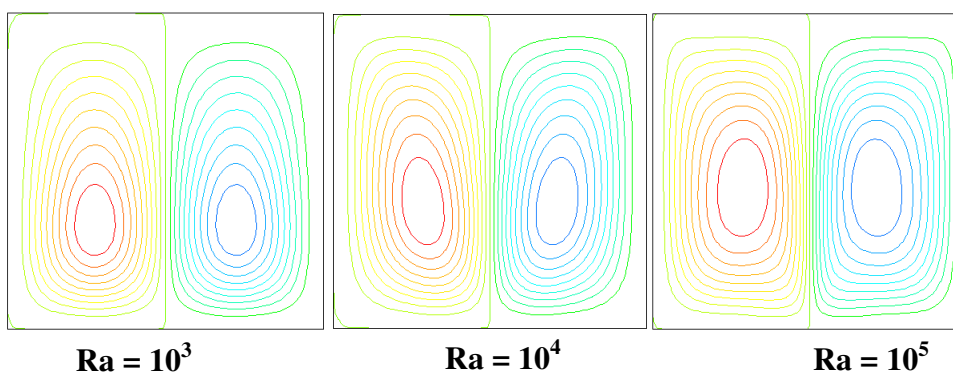
**Figure III.10:** Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Cu-eau), pour différentes concentrations source localisé au milieu.



Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,0$

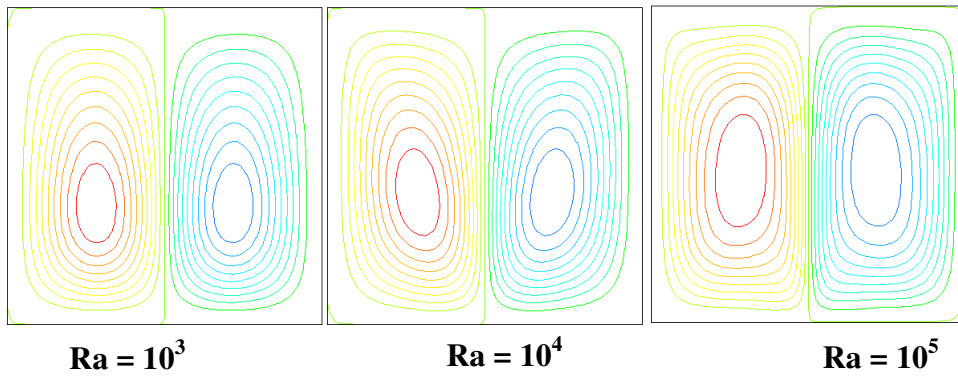


Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,02$

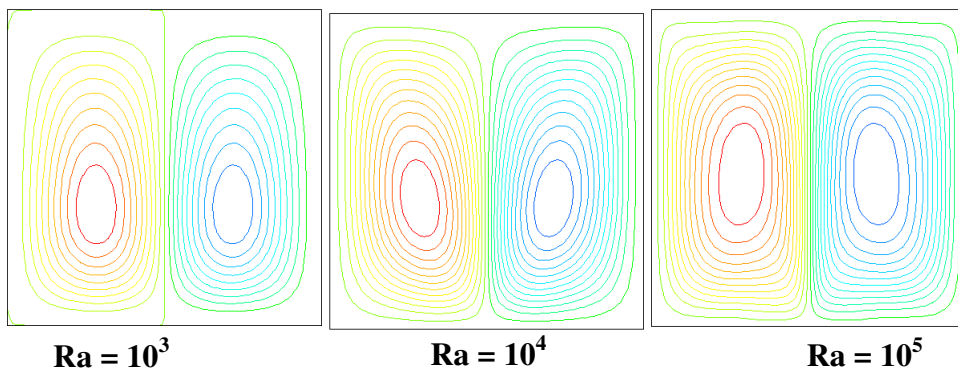


Nanofluide (Ag / Eau),  $\phi = 0,04$

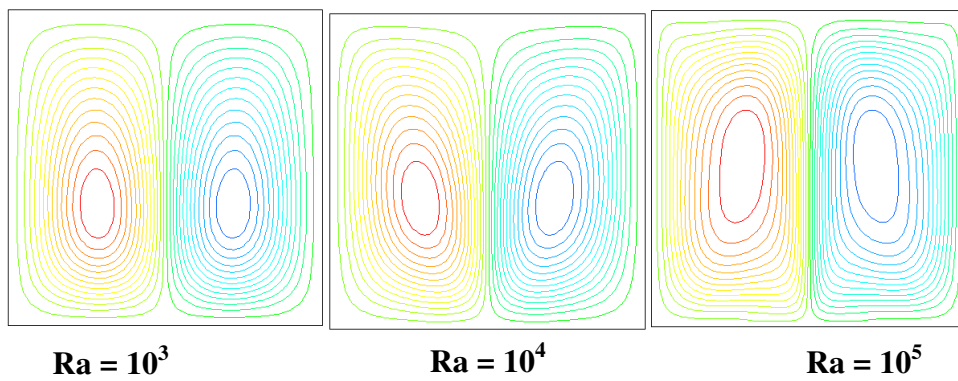
**Figure III.11:** Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag-eau), pour différentes concentrations source localisé au milieu.



Nanofluide hybride (Ag -Cuo / Eau),  $\phi = 0,02$

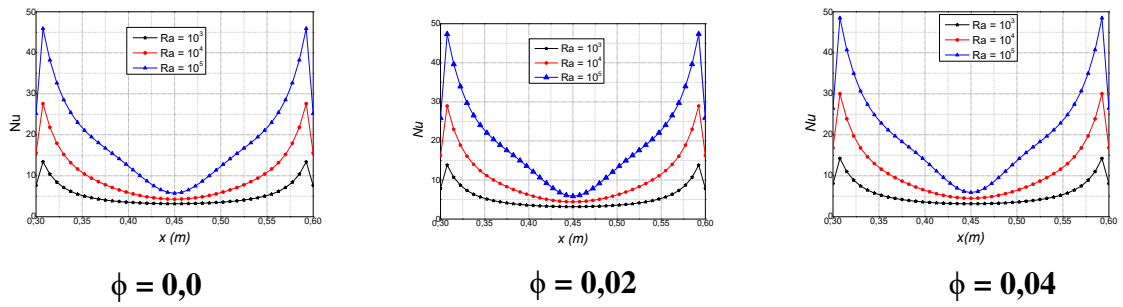


Nanofluide hybride (Ag - Cuo / Eau),  $\phi = 0,2$

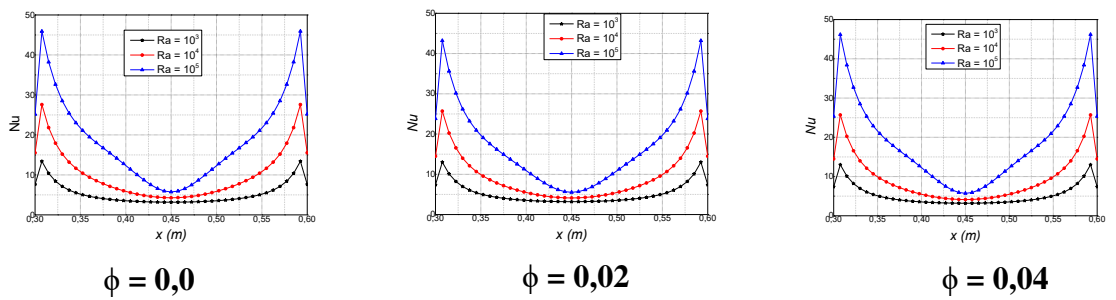


Nanofluide hybride (Ag - Cuo / Eau),  $\phi = 0,4$

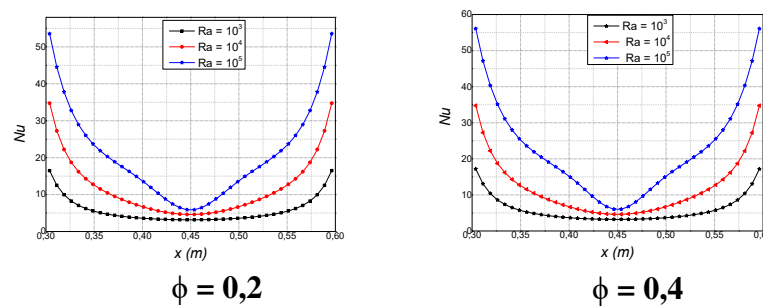
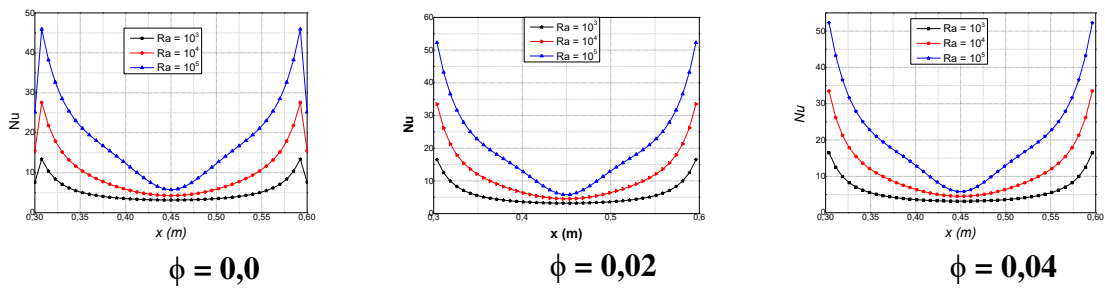
**Figure III.12:** Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du ( Ag-Cuo /eau) pour différentes concentrations source localisé au milieu.



**Nanofluid (Cu / Eau)**

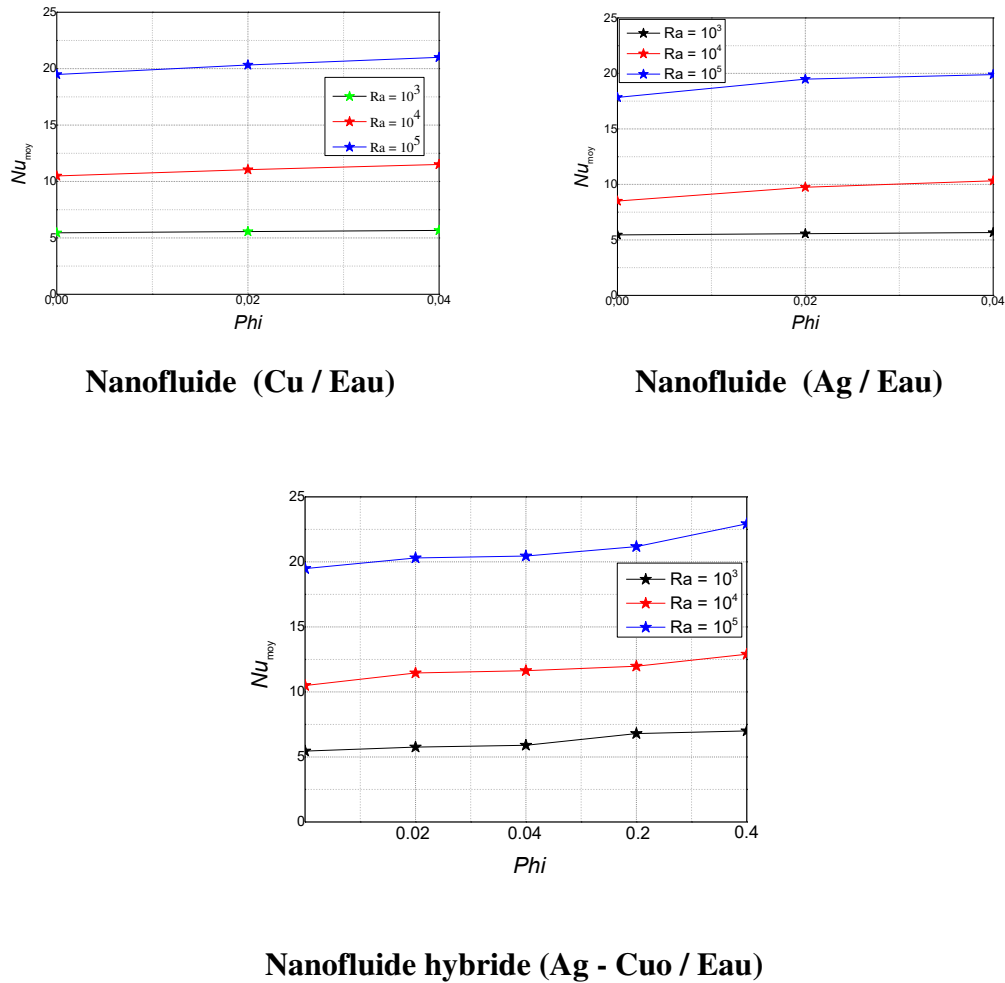


**Nanofluid (Ag / Eau)**



**Nanofluid hybride (Ag - Cu / Eau)**

**Figure III.13:** Variation du Nusselt local sur la paroi chaude pour différents nanofluides.



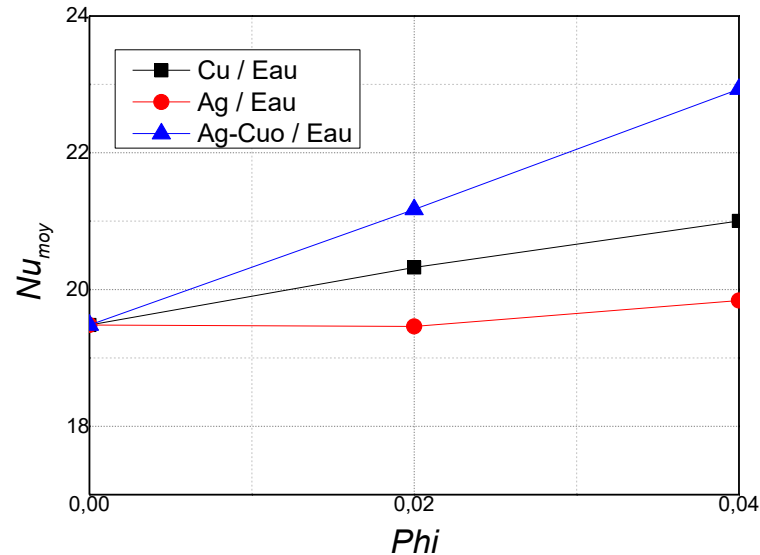
**Figure III.14:** Profile de Nombre du Nusselt moyen au long de la source de chaleur au milieu de l’enceinte pour différents nombre de Rayleighet différents types des nanofluides.

### III.4.2. Effet de la nature de nanofluide

L’effet de la nature de nanofluide et nanofluide hybride sur les échanges thermiques par convection naturelle au sien de l’enceinte sera étudié dans cette partie de notre travail. Nous considérons une cavité carrée remplie par différents nanofluides (Cu-eau, Ag-eau) et nanofluide hybride (Ag-Cuo /eau) avec différentes concentrations.

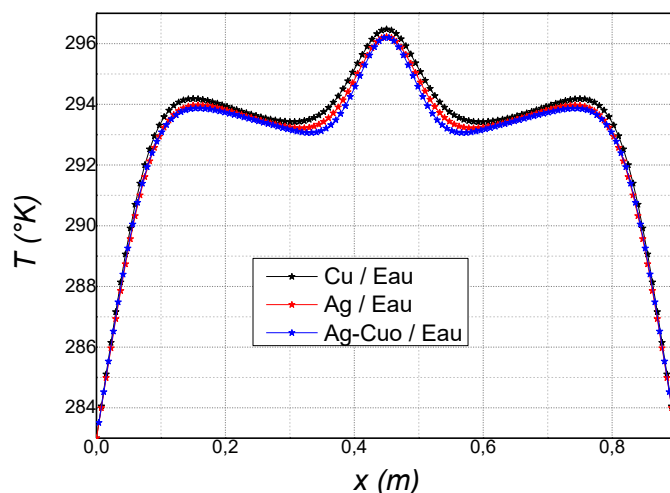
figure III.15: montre que le nombre de Nusselt sur la paroi chaude augmente linéairement lorsque en augmentant la concentration de nanoparticules. Cette augmentation est plus considérable pour le nanofluide hybride (Ag-Cuo/eau) quel que soit la fraction volumique des nanoparticules et devienne plus évidente pour les valeurs élevées de Rayleigh

(la convection dominée). Le taux de transfert de chaleur minimum est obtenu pour le Ag-eau pour tous les nombres de Rayleigh.



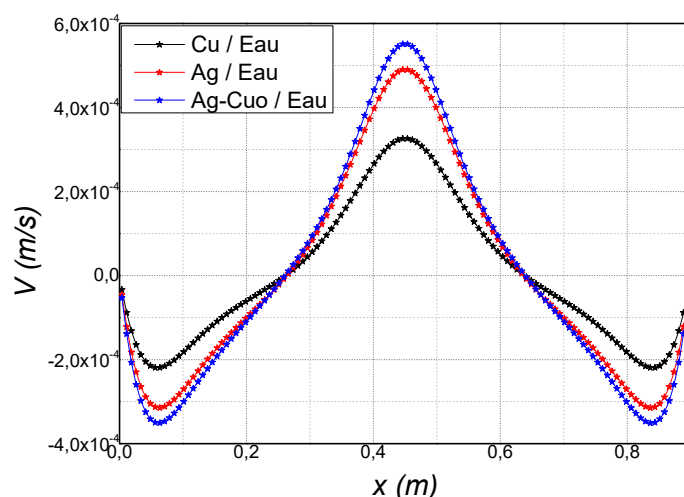
**Figure III.15:** Nusselt moyen pour les différents nanofluides et hybride en fonction de la concentration volumique ( $Ra = 10^5$ ).

La figure III.16 présente les profils de températures au milieu de la cavité. La figure présente clairement que les valeurs maximales de la température sont observées au milieu de la cavité et les grandes valeurs sont enregistrées pour le nanofluid Cu-eau. Il est aussi noté que les valeurs maximales pour le nanofluid hybride (Ag-Cuo/eau) est inférieur aux autres valeurs des nanofluides, ce qui présente une meilleure performance de refroidissement dans la cavité.



**Figure III.16:** Profil de la température statique de la section médiane pour différents nanofluides et hybride, concentration volumique  $\phi= 0.04$  et  $Ra = 10^5$ .

La figure III.17 présente les profils de vitesse verticale le long de la partie centrale de l'enceinte pour différents nanofluides et hybride au  $Ra=10^5$  et  $\phi=0.04$  valeur de la fraction volumique. Une répartition symétrique des vitesses qui indique l'existence de deux vortex contrarotatifs. D'après cette figure il est clair que l'amplitude maximale de la vitesse verticale est enregistrée pour les nanofluides hybride (Ag-Cuo/eau) (grande évacuation de la chaleur) suivit par Ag-eau puis le nanofluide Cu-eau en dernière position.



**Figure III.17:** Profil de la vitesse transversale le long de la partie centrale de l'enceinte pour différents nanofluides et hybride, concentration volumique  $\phi=0.04$  et  $Ra = 10^5$ .

## Conclusion général

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une cavité remplie dans le cas d'un mélange d'eau purs, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu) et nanoparticule hybride (Ag- CuO).

La configuration géométrique du modèle physique est un enceinte carrée, cette dernière est chauffée isothermiquement par le bas. En effet, 1/3 de la surface de la paroi inférieure est chauffée par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les deux parois verticales latérales sont refroidies et la paroi supérieure est maintenue adiabatique, . Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance (Power- Low).

En se basant sur la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations mathématiques, nous avons pu déterminer les lignes de courant, les isothermes ainsi que les variations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh. Les résultats de simulation sont obtenus avec le code FLUENT.

Les simulations numériques sont effectuées pour un nombre de Rayleigh variant de 103 à 105, et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.0, 0.02, 0.04, 0.2 et 0.4). Pour examiner profondément les effets des paramètres pertinents sur l'écoulement hydrodynamique et le transfert de chaleur dans notre configuration, nous allons subdiviser cette étude en deux parties principales :

- Effet de concentration des nanoparticules.
- Effet de types des nanoparticules.

Les résultats principaux se résument dans:

- a) La différence de transfert de chaleur, en utilisant différents nanofluides, augmente avec l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules.
- b) Le transfert de chaleur est meilleur quand l'élément chauffant est centré est centré  $x=1/2$
- c) l'existence de nanoparticules ce qui signifie une amélioration du taux de transfert de chaleur ce qui est indiqué par l'augmentation du nombre de Nusselt.

- d) L'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé.
- e) On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de le nombre de Rayleigh et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules de Cu, Ag et nanoparticules hybride Ag-Cuo .
- f) le nombre de Nusselt augmente linéairement lorsqu'en augmentant la concentration de nanoparticules Surtout dans le cas nanofluide hybride (Ag-Cuo-eau) et devienne plus évidente pour les valeurs élevées de Rayleigh (la convection dominée). Le taux de transfert de chaleur minimum est obtenu pour le Ag-eau pour tous les nombres de Rayleigh et montre que l'argent est un bon conducteur de chaleur par rapport au Ag.
- g) L'amélioration de la convection naturelle à l'intérieur de ce système par l'ajout de nanoparticules hybrides est plus importante lorsque la convection a lieu.

## **PERSPECTIVES**

Ce travail mérite d'être élargi par des études complémentaires pour mieux comprendre ce phénomène de convection naturelle dans les enceintes, pour cela nous suggérons ce qui suit

- Une étude tridimensionnelle expérimentale et numérique de ce phénomène.
- L'influence de l'instationnarité et le régime d'écoulement.
- La génération de l'entropie dans les enceintes

## Références

- [1] Hakan F. Oztop, Eiyad Abu-Nada,' Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids', International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008.
- [2] H. Salhi et M. Si-Ameur,' Convection naturelle dans les enceintes: nanofluide', Université El-Hadj Lakhdar, 2012.
- [3] Mohamed El Hattab, Rachid Mir, Youness El Hammami, Touria Mediouni,' Simulation Numerique De La Convection Naturelle Des Nanofluides Dans Une Enceinte Carree Chauffee Par Une Source De Chaleur', Laboratoire De Mécanique, Procédés De l'Energie Et De l'Environnement (LMP2E) Ecole Nationale Des Sciences Appliquées, B.P. 1136, Agadir, Maroc, 2013.
- [4] Soufi El Habib,' Application Des NANOFUIDES Pour Le Refroidissement : Etude D'un Cas D'une Géométrie Simple', Université KASDI Merbah d'Ouargla, 2013.
- [5] Lebbihi Saci,' Refroidissement Par Convection Naturelle D'une Source De Chaleur Localisee Au Fond D'une Enceinte Remplie De Nanofluide', Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [6] KLALECHE Sofiane MADJOUR Abderrahmane,' Simulation Numérique De La Convection Forcée Entre Deux Disques En Présence D'un Nanofluide', UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, 2015.
- [7] El Khaoudi Fatima, 'Gueraoui Kamal, Man-Layakhaf Samir,' La Convection Naturelle Des Nanofluides En Cavité Rectangulaire Verticale', Casablanca(Maroc) ,2014.
- [8] Salhi Hicham,' Etude Numerique De La Convection Naturelle Dans Les Enceintes: Nanofluide', Universite De Batna, 2015.
- [9] Billel BOUDJENIBA, Salah LAOUAR, El Hacene Mezaache,' Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Contenant Un Nanofluide', Université 20 Août 1955 De Skikda, 2015.
- [10] Hamdi Moumni, Hedia Welhezi, Ridha Djebali, Ezeddine Sediki,' Accurate finite volume investigation of nanofluid mixed convection in two-sided lid driven cavity including discrete heat sources', Univ. Tunis El-Manar, Tunisia, 2015.
- [11] DADDA Mouhamed Lamine,' Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée', Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2016.
- [12] Abdelkader Boutra, Karim Ragui, Nabila Labsi, Youb Khaled Benkahla , Rachid Bennacer,' Convection Mixte Au Sein D'une Cavité Carrée Entraînée Remplie D'un Nanofluide Et Munie D'un Bloc Générateur De Chaleur', Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene, Ecole Préparatoire Aux Sciences Techniques Alger Et L.M.T. Cachan 61, Avenue Du Président Wilson 94235 CACHAN Cedex, France,2016 .

- [13] Said BOUCHTA, M'barek FEDDAOUI, Hossine El IHSSINI, 'ETUDE NUMÉRIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DES NANOFLUIDES DANS UN ESPACE ANNULAIRE ENTRE DEUX CAVITÉS CARRÉES', Université Ibn Zohr, Laboratoire LMP2E, ENSA, BP 1136 Agadir, Maroc, 2017.
- [14] M. El Hafad Bara, Mme. Sakina El Hamdani, M. A. Bendou, M. Karim Limam, 'Etude Numérique De La Convection Naturelle Du Mélange Eau-Cu Dans Une Cavité Partiellement Chauffée', Université De La Rochelle, Av. Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France, 2017.
- [15] M. BENZEMA, Y.K. BENKAHLA, A. BOUDIAF, S. OUYAHIA, 'Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag- MgO /Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique', a. Laboratoire des Phénomènes de Transfert, FGMGP, USTHB, BP, 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie. 2017.
- [16] Tanzila Hayat et S. Nadeem, 'Heat transfer enhancement with Ag-CuO/water hybrid nanofluid', Department of Mathematics, Quaid-i-Azam University, Islamabad 44000, Pakistan, 2017.
- [17] Bouchoucha Abd El Malik, 'Generation D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle D'un Nanofluide', Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2017.
- [18] BOUHABEL Bourhane GUERMAT Zouhir, 'Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Inclinée Saturée Par Des Fluides Et Des Nanofluides', Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [19] BENKHEDDA Mohammed, 'Étude Numérique des écoulements Thermoconvectifs d'un Nanofluide à travers un Espace Cylindrique Annulaire muni d'Ailettes', thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2018.
- [20] BOUDAUD Warda, 'Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides', Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf, 2018.
- [21] GHADBANE Abdelouahab, 'Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur', Université de M'sila, 2019.
- [22] Saeed Dinarvand, Mohammadrezanademi Rostami et ioan pop, 'A novel hybridity model for  $TiO_2$ -CuO/water hybrid nanofluid flow over a static/moving wedge or corner', Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran. Department of Mathematics, Babeş-Bolyai University, 400084, Cluj-Napoca, Romania, 2019.
- [23] Tahar Tayebi et Ali J. Chamkha, 'Magnetohydrodynamic Natural Convection Heat Transfer of Hybrid Nanofluid in a Square Enclosure in the Presence of a Wavy Circular Conductive Cylinder', Article in Journal of Thermal Science and Engineering Applications, June 2020.

## Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique de l'écoulement laminaire stationnaire par convection libre dans une cavité bidimensionnelle remplie de différents nanofluides (nanofluides et nanofluides hybride) a été réalisée et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu) et nanoparticule hybride (Ag-CuO), pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^5$ , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0.0, 0.02, 0.04, 0.2 et 0.4) .. La cavité carrée est chauffée isothermiquement par le bas. En effet, 1/3 de la surface de la paroi inférieure est chauffée par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les deux parois verticales latérales sont refroidies et la paroi supérieure est maintenue adiabatique. Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance (Power-Low). Les résultats obtenus montrent Ils montrent que le transfert thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et du nombre du Rayleigh Ainsi le taux de transfert de chaleur (Nu) augmente avec l'augmentation de Ra.

Mot clé : Nanofluide, nanofluide hybride, Convection naturelle, transfert de chaleur, nombre de Rayleigh, cavité.

## Abstract

In this work, we conducted a digital study of the stationary laminar flow by free convection in a two-dimensional cavity filled with different nanofluids (nanofluids and hybrid nanofluids) was carried out and mixtures of this base fluid and nanoparticles (Ag, Cu) and hybrid nanoparticle (Ag-CuO), for a Rayleigh number varying from  $10^3$  to  $10^5$ , and a volume fraction of the nanoparticles between (0.0, 0.02, 0.04, 0.2 and 0.4). The square cavity is heated isothermally from below. Indeed, 1/3 of the surface of the lower wall is heated by a heat source (The source is to maintain the lower wall at constant temperature), the two vertical side walls are cooled and the upper wall is kept adiabatic. The governing equations have been solved numerically via the finite volume method using a power law scheme (Power-Low). The results obtained show They show that the heat transfer increases with the increase of the volume fraction and the number of Rayleigh Thus the heat transfer rate (Nu) increases with increasing Ra.

**Keywords:** Nanofluid, hybrid nanofluid, Natural convection, heat transfer, Rayleigh number, cavity.

## ملخص:

في هذا العمل تم إجراء دراسة عددية للتدفق الصفحي الثابت عن طريق الحمل الحراري الحر في تجويف ثنائي الأبعاد مملوء بالسوائل النانوية المختلفة (السوائل النانوية والسوائل النانوية الهجينة) وتم إجراء خلط من هذا السائل الأساسي والجسيمات النانوية (Ag, Cu). والجسيمات النانوية الهجينة (Ag-CuO)، لعدد رايلي يتراوح من  $10^3$  إلى 105، وجزء حجمي من الجسيمات النانوية بين (0.0، 0.02، 0.04، 0.2 و 0.4). يتم تسخين التجويف المربع بدرجة حرارة متساوية من الأسفل. في الواقع يتم تسخين ثلث سطح الجدار السفلي بواسطة مصدر حرارة (المصدر هو الحفاظ على الجدار السفلي عند درجة حرارة ثابتة)، ويتم تبريد الجدارين الجانبيين الرأسيين والجدار العلوي ثابت الحرارة. والمعادلات التي تم استعمالها تم تحليلها بواسطة طريقة الحجم المنتهية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن انتقال الحرارة يزداد مع زيادة الكسر الحجمي والعدد رايلي Rayleigh وبالتالي فإن معدل نقل الحرارة (Nu) يزداد بزيادة Ra.

الكلمات المفتاحية: مائع نانوي، مائع نانوي هجين، الحمل الحراري الطبيعي، نقل الحرارة، رقم رايلي، تجويف