

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Centre Universitaire BOUSSOUF Abdelhafid -Mila**  
**Institut des Sciences et Technologie**  
**Département de Génie Mécanique et Électromécanique**



N°Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme**  
**de MASTER**  
**Spécialité : Énergétique**

**Transfert de chaleur d'un nanofluide dans un**  
**réipient conique**

**Réalisé par :**  
**- DJEBLI Roumaissa**  
**- FELAHI Sara**

**Soutenu devant le jury:**

**M. TOUAHRIA ABDELJAWAD**  
**M. ZERARI KHALIL**  
**M. BENDJAGHLOULI Ali**

**Président**  
**Examineur**  
**Encadreur**

**Année universitaire : 2021/2022**

## *Remerciements*

Avant tout , nous remercions Allah tout puissant de nous avoir accordé la force , le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce modeste travail .

En second , nous remercions nos parents qui n'ont épargné aucun effort pour nous éduquer et nous fournir tous les moyens nécessaire pour présenter ce mémoire.

Au terme de ce travail nous tenant à remercier tout d'abord notre encadreur Dr :  
BENDJAGHLOULI ALI.

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux membres du jury, Dr TOUAHRIA ABD.DJ  
et Dr ZERARI KHALIL .

Enfin , nous remercions aussi nos amis et nos collègues.

## *Dédicace*

*Je Dédie ce modeste Travail :*

➤ *A mes parents.*

✓ *A mes frères et mes sœurs.*

✓ *A mon fiancé .*

✓ *A toute ma famille et à mes amis.*

✓ *A toute la promotion Génie- Mécanique Energétique.*

✓ *A tous ceux qui me sont chers .*

*Roumaissa - Sara.*

## Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique de la convection naturelle laminaire dans un cône tronqué rempli chaque fois de trois nano-fluides, l'eau pure est considérée comme le fluide de base avec  $Pr = 6.2$  et (Cu, Ag et  $Al_2O_3$ ). Les parois inclinées sont thermiquement isolées où la source de chaleur est située sur la paroi inférieure du récipient conique. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations gouvernantes en utilisant l'algorithme SIMPLE pour différents paramètres tels que le nombre de Rayleigh ( $10^3$ ,  $10^4$  et  $10^5$ ). Cette étude comparative entre les trois nano-fluides a montré une amélioration du système de refroidissement utilisant un nano-fluide (eau- $Al_2O_3$ ) par rapport aux autres.

## **Abstract**

In this work we carried out a numerical study of laminar natural convection in a truncated cone filled each time with three nano-fluids, pure water is considered as the basic fluid with  $Pr = 6.2$  and (Cu, Ag and  $Al_2O_3$ ). The sloped walls are thermally insulated where the heat source is located on the bottom wall of the conical vessel. The finite volume method is used to solve the governing equations using the SIMPLE algorithm for different parameters such as the Rayleigh number ( $10^3$ ,  $10^4$ , and  $10^5$ ). This comparative study between the three nano-fluids showed an improvement of the cooling system using a nano-fluid (water- $Al_2O_3$ ) compared to the others.

## ملخص

في هذا العمل أجرينا دراسة عددية للحمل الحراري الطبقي الطبيعي في مخروط مقطوع مملوء كل مرة بثلاثة سوائل نانوتية، يعتبر الماء النقي السائل الأساسي مع  $Pr = 6.2$  و  $(Cu Ag Al_2O_3)$ ، الجدران المنحدرة معزولة حرارياً حيث يوجد مصدر الحرارة على الجدار السفلي للوعاء المخروطي. يتم استخدام طريقة الحجم المحدود لحل المعادلات الحاكمة باستخدام خوارزمية SIMPLE لمعاملات مختلفة مثل رقم  $Rayleigh (10^3 10^4 10^5)$ . أظهرت هذه الدراسة المقارنة بين السوائل النانوتية الثلاثة تحسناً في نظام التبريد باستخدام سائل النانو (water- $Al_2O_3$ ) مقارنة بالآخرين.

# Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

I.1. Généralités : .....	2
I.2. Revue bibliographique : .....	2
I.3. Généralité sur les nanofluides : .....	4
I.3.1. Définition : .....	4
I.3.2. Préparation des nanofluides : .....	4
I.3.3. Les applications des nanofluides : .....	5
I.3.4. Types de nanoparticule : .....	6
I.3.5. Les avantages et les inconvénients des nanofluides : .....	7

## Chapitre II : Géométries-modèles mathématiques

II.1. Description de la forme géométrique choisie : .....	8
II.2. Hypothèses simplificatrices : .....	9
II.3. Equations de transport bidimensionnelles : .....	10
II.4. Les conditions initiales et aux limites à l'état : .....	11

II.5. Les propriétés du nanofluide: .....	14
II.5.1. La Masse volumique ( $\rho$ ) :.....	15
II.5.2. La chaleur spécifique ( $c_p$ ) : .....	15
II.5.3. L'expansion thermique ( $\beta$ ) : .....	15
II.5.4. La viscosité dynamique ( $\mu$ ) : .....	16
Conclusion :.....	18

### **Chapitre III : Méthode numérique**

III.1. Notion générale sur la méthode des volumes finis :.....	19
III.2. Etapes de résolution par la méthode des volumes finis :.....	20
III.2.1. Maillage :.....	20
III.2.2. Discrétisation :.....	21
III.2.3. GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit):.....	25
III.2.4. FLUENT : .....	27
Conclusion :.....	29

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1. Les propriétés de l'eau et les nano-fluides :.....	30
IV.2. Validation du code : .....	30
IV.3. Le nano-fluide cu -eau : .....	32
IV.4. Le nano-fluide Ag -eau : .....	35
IV.5. Le nano-fluide $Al_2O_3$ -eau : .....	38
IV.6. Les trois nano-fluides :.....	41
Conclusion générale .....	44
Bibliographies .....	45



## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Procèdes de synthèse de nano fluide en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA).....	5
<b>Figure II.1.</b> schéma de principe du modèle physique. ....	9
<b>Figure II.2.</b> Schématisation des conditions aux limites du problème adimensionnel. ....	12
<b>Figure III.1.</b> Schéma du volume de contrôle dans le cas bidimensionnel. ....	21
<b>Figure III.2.</b> Organigramme de l'algorithme SIMPLE.....	24
<b>Figure III.3.</b> l'interface de Gambit.....	26
<b>Figure III.4.</b> L'interface du fluent.....	28
<b>Figure IV.1.</b> Comparaison des isothermes et des contours de la fonction de courant. ....	31
<b>Figure IV.2.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour $Ra=10^3$ ....	32
<b>Figure IV.3.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour $Ra=10^4$ ....	32
<b>Figure IV.4.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour $Ra=10^5$ ....	33
<b>Figure IV.5.</b> Profils de Température adimensionnelle $\theta$ à la hauteur du cône pour $Ra=10^5$ .....	33
<b>Figure IV.6.</b> Profil du nombre de Nusselt le long de la paroi inferieur du cône pour $Ra=10^5$ ....	34
<b>Figure IV.7.</b> La vitesse verticale au milieu du cône pour $Ra=10^5$ .....	34
<b>Figure IV.8.</b> L'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour le nano-fluide (cu-eau).....	35
<b>Figure IV.9.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour $Ra=10^3$ ...	36
<b>Figure IV.10.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour $Ra=10^4$ .	36
<b>Figure IV.11.</b> Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour $Ra=10^5$ .	36
<b>Figure IV.12.</b> La vitesse verticale au milieu du cône pour $Ra=10^5$ relatives au nano-fluide (Ag-eau).....	37
<b>Figure IV.13.</b> Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inferieur du cône pour $Ra=10^5$ relatives au nano-fluide (Ag-eau).....	37
<b>Figure IV.14.</b> Profils de température adimensionnelle $\theta$ à la hauteur du cône pour $Ra=10^5$ .....	38
<b>Figure IV.15.</b> Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau) pour $Ra=10^3$ .....	38

<b>Figure IV.16.</b> Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour $\text{Ra}=10^4$ .....	39
<b>Figure IV.17.</b> Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour $\text{Ra}=10^5$ .....	39
<b>Figure IV.18.</b> La vitesse verticale au milieu du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau).....	40
<b>Figure IV.19.</b> Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inferieur du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau).....	40
<b>Figure IV.20.</b> Profils de température adimensionnelle $\theta$ à la hauteur du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau).....	41
<b>Figure IV.21.</b> Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inferieur du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au trois nano-fluides (Cu-eau, Ag-eau et $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).....	41
<b>Figure IV.22.</b> Profil de température adimensionnelle $\theta$ à la hauteur du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au trois nano-fluides (Cu-eau, Ag-eau et $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).....	42
<b>Figure IV.23.</b> Profil de la vitesse verticale au milieu du cône pour $\text{Ra}=10^5$ relatives au trois nano-fluides (cu-eau, Ag-eau et $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).....	42
<b>Figure IV.24.</b> L'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour les trois nano-fluides (Cu –eau, Ag-eau et $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau).....	43

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides. ....	8
<b>Tableau III.1</b> . Schéma de discrétisations.....	28
<b>Tableau IV.1</b> . Les propriétés des nano-fluides utilisés. ....	30

## Nomenclature

<b>D<sub>1</sub></b> : rayon bas de la cavité.....	[m].
<b>D<sub>2</sub></b> : rayon haut de la cavité .....	[m].
<b>T<sub>c</sub></b> : Température froid .....	[K].
<b>T<sub>s</sub></b> : température de la source .....	[K].
<b>T<sub>h</sub></b> : température chaude .....	[K].
<b>T<sub>0</sub></b> : Température de référence .....	[K].
<b>H</b> : la hauteur de la cavité .....	[m].
<b>H/D</b> : rapport d'aspect	$H/D=2$
<b>Pr</b> : Nombre de Prandlt.	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
<b>Nu</b> : nombre de Nusselt.	$Nu = \frac{hH}{k_f}$
<b>Ra</b> : Nombre de Rayleigh.	$Ra = Ra = \frac{g\beta H^3(T_h - T_c)}{\nu\alpha}$
<b>g</b> : Accélération de pesanteur .....	[m. s <sup>-2</sup> ].
<b>h</b> : coefficient d'échange convectif .....	[W/m <sup>2</sup> .K].
<b>t</b> : Temps .....	[s].
<b>C<sub>P</sub></b> : Chaleur spécifique à pression constante .....	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ].
<b>V</b> : volume .....	[m <sup>3</sup> ].
<b>m</b> : la masse .....	[kg].
<b>p</b> : la pression .....	[Pa].
<b>q "</b> : la quantité de chaleur de la source par unité de surface.....	[W/m <sup>2</sup> ].
<b>S<sub>Φ</sub></b> : Terme source.	
<b>Γ<sub>Φ</sub></b> : coefficient de diffusion	
<b>u, v</b> : les composants de vitesse dans la direction des x, y .....	[ms <sup>-1</sup> ].
<b>U, V</b> : les composants adimensionnelle de vitesse (uH/af , vH/af).	
<b>x, y</b> : Coordonné cartésienne .....	[m].
<b>X, Y</b> : coordonnées adimensionnelle (x/H ; y/H).	

$\Delta x$  : variation de x ..... [m].

$\Delta y$  : variation de y ..... [m].

**Symboles grecs :**

$\alpha$  : Diffusivité thermique ..... [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>].

$\beta$  : Coefficient d'expansion thermique à pression constante ..... [K<sup>-1</sup>].

$\mu$  : Viscosité dynamique ..... [kg. m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>].

$\nu$  : Viscosité cinématique ..... [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>].

$\rho$  : Masse volumique ..... [kg. m<sup>-3</sup>].

$\rho_0$  : Masse volumique du fluide à T<sub>0</sub>..... [kg. m<sup>-3</sup>].

$\psi$  : Fonction de courant adimensionnelle.

$\Delta T$  : la différence de température.

$\Theta$  : Température adimensionnelle.  $\Theta = \frac{T-T_c}{T_h-T_c}$

$\Omega$  : vorticité adimensionnelle.

$\emptyset$  : fraction volumique.

$\Phi$  : variable dépendante.

**Les indices :**

**n<sub>f</sub>** : nanofluide.

**p** : particule.

**f** : fluide de base.

**c** : chaude.

**max**: maximale.

**Rouge** : nanofluide.

**Vert** : eau.

**Orange** : chaude.

**Bleu** : Froid.

**i** : suivant la direction x.

**j** : suivant la direction y.

**n** : Indice d'itérations.

**\*** : valeur estimée.

**'** : Indice de la correction ou les fluctuations

## Introduction générale

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

Les fluides et les huiles normal qu'ont utilisé généralement pour le refroidissement présente un souci du volume de ces fluides, qui il peut être très considérable (volume occupe par le fluide de refroidissement), par exemple pour refroidie un système, on a besoin d'un grand volume de fluide de refroidissement et quelque fois le refroidissement d'un système prend des temps long.

Dans cette étude on essayera de montre la potentialité de remplacer les fluides et les huiles de refroidissement avec un nano-fluide qui est peut jouer le même rôle que ces fluides ordinaires mais avec une bonne efficacité du dégagement de la chaleur.

Dans notre travail, nous étudions la convection naturelle laminaire dans une enceinte conique remplie chaque fois des nano-fluides tel que (Cu-eau, Ag-eau et  $Al_2O_3$ ). Notre objectif est de comprendre l'effet du nano-fluide sur le mécanisme de la convection naturelle dans les enceintes. Dans ce contexte, nous avons utilisé le code commercial Fluent. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ( $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ ).

Dans ce mémoire, on organise quatre chapitres :

Le premier chapitre, présente les généralités et revue bibliographique sur le transfert de chaleur ainsi que les généralités sur les nano-fluides.

Le deuxième chapitre, présente la géométrie le modèle physique à choisi, et les modèles mathématiques à savoir les équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites et les propriétés du nano-fluide.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la méthode des volumes finis, sa mise en œuvre pour la discrétisation des équations du problème ainsi que la présentation de GAMBIT et de FLUENT :

Dans le quatrième chapitre présent les résultats et discussion des divers résultats de cette étude paramétrique.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin du mémoire.

## Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

### I.1. Généralités :

L'étude du transfert de chaleur par convection est un domaine de recherche depuis plusieurs décennies. Il existe une grande quantité de publications scientifiques consacrées à l'étude de convection naturelle dans les cavités. Mais peu d'entre elles ont été consacrées aux nanofluides.

La plupart des études ayant été généralement menés avec l'eau, l'huile comme fluide de base. On sait que les transferts de chaleur par convection peuvent augmenter considérablement en changeant la configuration de l'écoulement ou en augmente les surfaces d'échange entre la paroi et le fluide.

### I.2. Revue bibliographique :

L'étude numérique rapportée ici concernait les flux produits dans des conteneurs coniques tronqués remplis d'un cuivre contenant du nanofluide à base d'eau (Cu). Les deux paramètres nécessaires pour caractériser le problème sont le Rayleigh numéro  $Ra$ , et l'angle de pente de la paroi inclinée,  $\alpha$ . Ce problème peut être rencontré dans un certain nombre de dispositifs de refroidissement électroniques équipés de nanofluides.

Le mélange résultant du fluide de base et des nanoparticules ayant des propriétés physiques et chimiques uniques est appelé nanofluide. On s'attend à ce que la présence des nanoparticules dans le nanofluide augmente la conductivité thermique et améliore sensiblement les caractéristiques de transfert de chaleur du nanofluide. Les boîtiers à chauffage différentiel sont largement utilisés pour simuler le transfert de chaleur par convection naturelle dans les systèmes utilisant des nanofluides [1-2]. Récemment, Oztop et Abu-Nada [3] ont étudié numériquement le transfert de chaleur et le débit de fluide en raison des forces de flottabilité dans une enceinte partiellement chauffée à l'aide de nanofluides fabriqués avec différents types de nanoparticules. Ils ont soutenu que l'amélioration du transfert de chaleur était plus prononcée à faible rapport d'aspect qu'à des rapports d'aspect élevés de l'enceinte. Ils ont constaté que pour tous les nombres de Rayleigh, le nombre moyen de Nusselt augmentait à mesure que la fraction volumique des nanoparticules augmentait. Aminossadati et Ghasemi [4] ont présenté une étude numérique du refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur incorporée sur la paroi inférieure d'une enceinte remplie de nanofluides.



Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules dans l'eau pure améliore ses performances de refroidissement, en particulier à faible nombre de Rayleigh.

Le type de nanoparticules et la longueur et l'emplacement de la source de chaleur ont eu une incidence importante sur la température maximale de la source de chaleur. Différents types d'enceintes sous chauffage localisé ont été largement étudiés par de nombreux auteurs. Ben-Mansour et Habib [5] ont étudié le refroidissement naturel d'une cavité rectangulaire remplie de nanofluides Cu / eau. Ils ont constaté que le coefficient de transfert de chaleur au voisinage de la paroi gauche diminue de bas en haut de la paroi. Ils ont également observé l'augmentation du taux de transfert de chaleur avec l'augmentation de la fraction de volume solide.

Le problème du transfert de chaleur à convection sans effet stable d'une enceinte triangulaire à angle droit rempli d'un milieu poreux et saturé par un nanofluide a été étudié numériquement par Sun et Pop [6]. Pour l'enceinte, la source de chaleur est située sur la paroi verticale, la paroi inclinée est froide avec une température fixe et la paroi verticale est adiabatique respectivement. Ils ont constaté que, le nombre de Nusselt a atteint une valeur maximale avec le nombre Ra le plus élevé et la plus grande taille du radiateur. Le transfert de chaleur dans la cavité est amélioré en diminuant le rapport d'aspect de l'enceinte et en abaissant la source de chaleur. En outre, le nanofluide à base de cuivre est apparu comme le meilleur nanofluide pour le transfert de chaleur.

La convection naturelle dans une cavité carrée bidimensionnelle remplie de nanofluide CuO à base d'eau a été étudiée par Abu-Nada et al. [7]. Ils considèrent que les murs verticaux sont chauds et froids, respectivement de gauche à droite. En outre, la paroi supérieure est partiellement chauffée par convection. Les surfaces horizontales de l'enceinte étaient adiabatiques sauf dans la zone de convection. Elles ont observé que, pour un faible nombre de Ra, le transfert de chaleur augmente avec le nombre de Biot et la fraction de volume de la nanoparticule. Le transfert de chaleur est également amélioré lorsque la longueur de la partie de convection de la cavité est augmentée.

Plus récemment, la convection naturelle des nanofluides dans les cavités a été étudiée à partir d'approches numériques et expérimentales dans [8-9].

Dans le présent travail, nous examinons l'effet de certains paramètres tels que le nombre de Rayleigh, l'angle d'inclinaison des parois inclinées de l'enceinte et la longueur de la source de chaleur sur la convection naturelle à l'intérieur du récipient conique rempli d'eau-Nanofluide de cuivre.

### I.3. Généralité sur les nanofluides :

#### I.3.1. Définition :

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

- ✓ L'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ .
- ✓ Le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre, CuO.
- ✓ L'or, Au.
- ✓ L'argent, Ag.
- ✓ Les nanotubes de carbone.
- ✓ Le dioxyde de titane,  $TiO_2$ .
- ✓ Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'aggrégations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont :
  - ✓ L'eau.
  - ✓ L'éthylène glycol, EG.
  - ✓ Les huiles.
  - ✓ Le Toluène.

#### 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 laser ou la précipitation chimique.

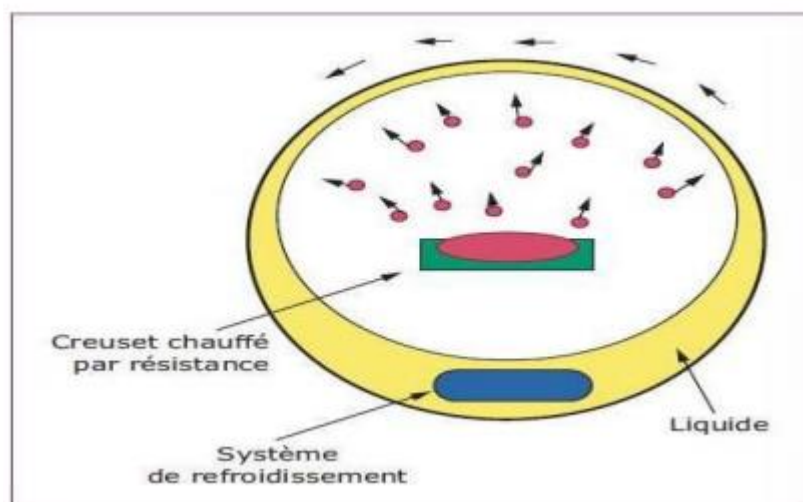
En outre, il existe deux méthodes principales pour produire des nano fluides :

- à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable

#### **La méthode à une seule étape :**

Consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nano fluides mais permet d'éviter l'agglomération et plus la conductivité thermique du mélange est améliorée.

Néanmoins, pour une famille de nano fluides donnée, les résultats de la littérature présentent une dispersion assez forte. Cette dispersion peut être attribuée au mode de synthèses des Nano fluides et/ou à la méthode de mesure.



**Figure I.1.** Procès de synthèse de nano fluide en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA).

- **La méthode à deux étapes :**

Consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrason est souvent nécessaire afin de briser agglomérant. En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH.

On peut également utiliser les forces de répulsion stérique à l'aide de molécule adsorbé ou greffées sur la surface.

### **I.3.3. Les applications des nanofluides :**

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs :

- ✓ Propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale).
- ✓ Propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées.

#### **En thermique :**

Les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées :

- ✓ Refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc).
- ✓ Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro Electro Mechanical Systems.
- ✓ Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs, réfrigérateurs domestiques, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique, ...).

#### **I.3.4. Types de nanoparticule :**

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories :

1. Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes de cuivre (oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ , oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane  $TiO_2$ ...).

##### **On prendre l'exemple des nanoparticules de cuivre :**

Les nanoparticules métalliques ont des conductivités thermiques plus grandes que celles des Oxydes métalliques correspondants. La conductivité thermique du cuivre à la température ambiante est environ 700 fois plus grande que celle d'eau et environ 3000 fois plus grande que celui d'huile du moteur. **Xuan et Li [10]** ont présente une étude prouvant que la conductivité

thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Le rapport de la conductivité thermique du nanofluide (eau+Cu) sur le fluide de base augmente 75%, quand la fraction volumique des nanoparticules varie entre 2.5% à 7.5%.

2. Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO<sub>2</sub>, Nanotube de silicium...).

### **I.3.5. Les avantages et les inconvénients des nanofluides :**

#### **❖ Les avantages :**

- ✓ 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 chaleur.
- ✓ Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ain miniaturisation du système.
- ✓ Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en fa varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

#### **❖ Les inconvénients :**

- ✓ 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.

## Chapitre II : Géométries-modèles mathématiques

L'étude d'un phénomène physique passe par la formulation des lois sous forme d'équations mathématiques reliant les différentes variables intervenant dans le déroulement du phénomène. En général, ces équations sont : l'équation de continuité qui traduit le principe de conservation de masse, les équations de Navier-Stokes qui traduisent le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie qui représente le principe de conservation de l'énergie. La description d'un problème donné passe aussi par la définition d'un certain nombre de conditions aux frontières et si le processus est stationnaire par des conditions initiales.

### II.1. Description de la forme géométrique choisie :

On se propose, comme schématisé à travers la **figure (II.1)**, Notre étude est basé sur un nano-fluide dans une cavité de forme conique tronqué , D1 le diamètre inférieur, D2 le diamètre supérieur et H son hauteur avec un rapport de forme  $H/D=2$ . L'enceinte est chauffée en bas par  $T_h$  et  $T_c$  à la paroi supérieur.

Alors que les parois latérales sont thermiquement isolées.

Enfin, toutes les propriétés physiques du fluide caloporteur sont supposées pour être newtoniens, à l'exception de la masse volumique dans le terme de poussée, qui suit l'approximation de Boussinesq.

Les propriétés thermo physiques de l'eau et des nanoparticules sont données dans le tableau(II.1).

	$\rho$ (Kg m <sup>-3</sup> )	Cp (J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	K (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\beta \cdot 10^5$ (k <sup>-1</sup> )
Eau	997.1	4179	0.613	21
Cuivre(Cu)	8933	385	401	1.67
Silver (Ag)	10.500	235	429	1.89
Alumina(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3970	765	40	0.85

**Tableau II.1 :** Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides [13].

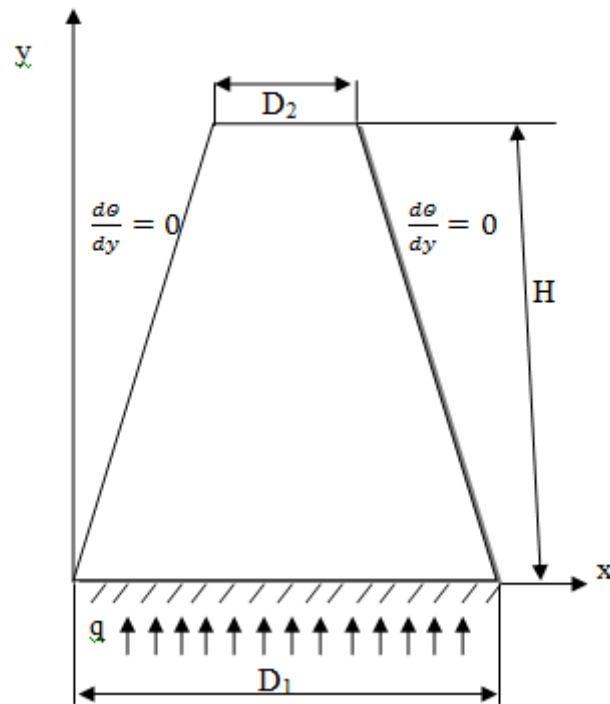


Figure II.1. schéma de principe du modèle physique.

## II.2. Hypothèses simplificatrices :

Pour simplifier la résolution du problème physique, des hypothèses simplificatrices sont introduites au niveau de la modélisation.

Nous nous limitons donc aux hypothèses couramment retenues dans les études de la convection naturelle qui est les suivantes :

- ✓ Le fluide est newtonien et incompressible.
- ✓ Le régime d'écoulement est considéré comme étant laminaire.
- ✓ le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ La dissipation visqueuse et le terme de pression dans l'équation de la chaleur sont négligeables.
- ✓ L'approximation de Boussinesq est valide : elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables aux niveaux de tous les termes des équations de quantité de mouvement ( $\rho_0 = \rho$ ), sauf au niveau du terme de gravité.

La variation est en fonction de la température est donnée comme suit :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec :

$T_0$  : température de référence,  $\beta$  est le coefficient d'expansion thermique à pression constante.

$\rho_0$  : est la masse volumique du fluide à  $T_0$ .

**II.3. Equations de transport bidimensionnelles :**

On applique les mêmes hypothèses de simplification que l'état précédente. Les études expérimentales des écoulements sont souvent effectuées sur des modèles et les résultats sont montrés dans une forme sans dimensions, permettant ainsi des mesures échelonnées vers les conditions réelles des écoulements. La même approche peut être aussi entreprise dans des études numériques

**• Equation de Continuité :**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \dots \dots \dots (II.2)$$

**• Equation de quantité de mouvement :**

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \right] \dots \dots \dots (II.3)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ - \frac{\partial P}{\partial X} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \right] \dots \dots \dots (II.4)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ - \frac{\partial P}{\partial X} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T-T_c) \right] \dots \dots \dots (II.5)$$

**• Equation de l'énergie :**

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \alpha_{nf} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right] \dots \dots \dots (II.6)$$

**• Equation de ligne de courant :**

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \dots \dots \dots (II.7)$$

Les équations gouvernantes peuvent être transformées à la forme sans dimensions en employant la normalisation appropriée.

En introduisant les variables adimensionnelles suivantes :



$$\left. \begin{aligned}
 X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{uH}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vH}{\alpha_f}, \quad P = \frac{\rho H^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2} \\
 Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{g \beta H^3 \Delta T}{\alpha_f \nu_f}, \quad \Theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, \quad \Delta T = \frac{q'' H}{k_f}
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (II.8)$$

Les équations du modèle mathématique sous forme adimensionnelles régissant l'écoulement, s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \dots \dots \dots (II.9)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \dots \dots \dots (II.10)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \frac{(\rho \beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{nf}} Ra Pr \Theta \dots \dots \dots (II.11)$$

$$U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) \dots \dots \dots (II.12)$$

**II.4. Les conditions initiales et aux limites à l'état :**

• **Les conditions initiales :**

Toutefois, pour la première exécution, on a supposé que le liquide soit au repos et la répartition de température soit nulle, Alors on aura:  $U = 0, V = 0, \Theta = 0$

• **Les conditions aux limites :**

- La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions initiales et aux limites pour chaque variable dépendante le fluide est au repos et sa température adimensionnelle est nulle dans toute la cavité.
- Les conditions de température sont connues sur les parois.
- La température adimensionnelle de la paroi gauche, droite et top est constante.
- La partie chaude au milieu de la paroi inférieure soumise à une température adimensionnelle.
- La condition d'adiabatique est adoptée pour la paroi inférieure.

$$\Theta = 0, U = 0, V = 0, Y = 1 \text{ pour } \frac{1}{8} \leq X \leq \frac{3}{8} \dots \dots \dots \text{(II.13)}$$

$$\Theta = 1, U = 0, V = 0, Y = 0 \text{ pour } 0 \leq X \leq \frac{1}{2} \dots \dots \dots \text{(II.14)}$$

$$U = 0, V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \text{ pour } \begin{cases} 0 \leq Y \leq 4X \\ 0 \leq X \leq \frac{1}{8} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.15)}$$

$$U = 0, V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \text{ pour } \begin{cases} \frac{1}{2} \leq Y \leq 2X - 1 \\ \frac{1}{2} \leq X \leq 2X - 1 \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.16)}$$

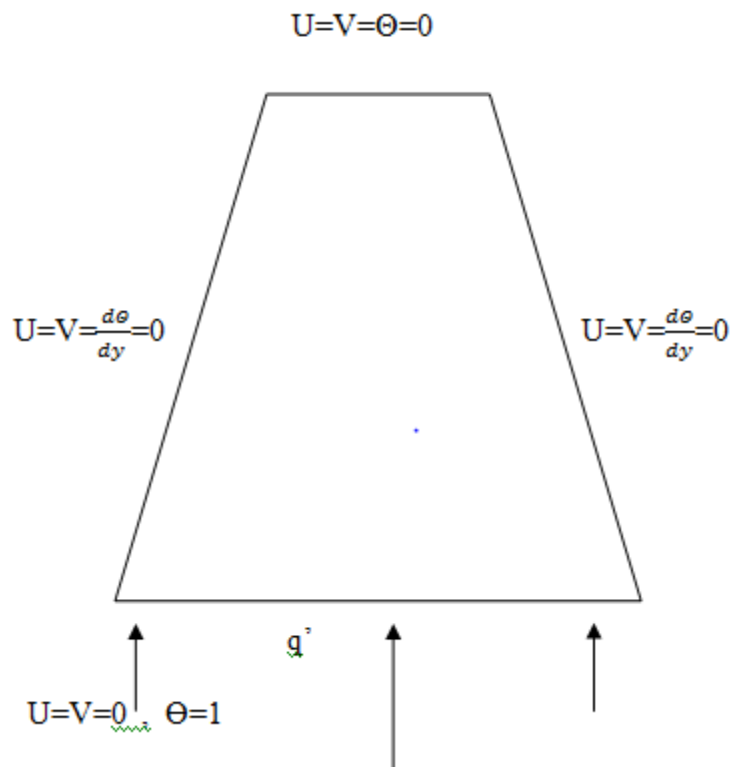


Figure II.2. Schématisation des conditions aux limites du problème adimensionnel.

➤ **La viscosité cinématique** : peut être calculée à partir :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots \text{(II.17)}$$

Avec :

$\mu$  : La viscosité dynamique.

$\rho$ : La masse volumique.

➤ **La diffusivité thermique** : du nanofluide est :

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \dots \dots \dots (II.18)$$

➤ **Le Nombre de Prandtl** :

Qui est le rapport de la viscosité cinématique  $\nu_{nf}$  et la diffusivité thermique  $\alpha_{nf}$ , il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux, Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, physicien allemand, Le nombre de Prandtl est donc le rapport de deux grandeurs ayant les mêmes dimensions, soient  $m^2/s$

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse.

Un nombre de Prandtl faible indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. Est donnée d'après par l'expression :

$$Pr = \frac{\nu_{nf}}{\alpha_{nf}} \dots \dots \dots (II.19)$$

➤ **Nombre de Rayleigh:**

$$Ra = \frac{g\beta H^3(T_h - T_c)}{\nu\alpha} = Gr * Pr \dots \dots \dots (II.20)$$

✓ Gradient de température dans le champ de gravite (direction y)

Le nombre de Rayleigh est directement lié à la convection.

La convection a lieu lorsque la poussée d'Archimède (due à la hausse de température) crée le mouvement du fluide.

Cependant, il faut que cette force d'Archimède soit assez grande pour contrer les forces visqueuses qui s'opposent au mouvement de la particule.

De plus, si l'équilibre thermique est atteint, il n'y a plus de force d'Archimède. La capacité d'une particule d'entrer en équilibre avec son environnement plus ou moins rapidement dépend de sa diffusivité thermique ( $\alpha$ )

Ra nous donne le rapport entre le temps pour que la chaleur diffuse et celui pour que la particule entre en mouvement.

✓ Gradient de température dans une direction différente de la gravité

Dans ce cas, il y a convection naturelle quel que soit la valeur de Ra parce que les particules de fluide n'ont pas à lutter contre la force de gravité pour se déplacer.

➤ **Le nombre de Nusselt :**

Est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infini.

On le définit de la manière suivante :

$$Nu = \frac{hH}{k_f} \dots \dots \dots (II.21)$$

Ou H est la hauteur de la cavité et k est la conductivité thermique du fluide.

h est le coefficient d'échange convectif, tel que h :

$$h = \frac{q''}{T_s - T_c} \dots \dots \dots (II.22)$$

**II.5. Les propriétés du nanofluide:**

Les propriétés thermo physiques des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Sont calculées par les formules suivantes [13].

➤ **La fraction volumique ( $\phi$ ):**

La fraction volumique est la propriété la plus important pour le nanofluide, puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le

volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante et notée  $\phi$ .

$$\phi = \frac{\text{volume particule}}{\text{volume totale du nanofluide}} = \frac{V_p}{V_p + V_f} \dots \dots \dots (II.23)$$

$V_p$  : volume de solide (nanoparticule).

$V_f$  : volume de fluide de base pure.

**II.5.1. La Masse volumique ( $\rho$ ) :**

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique  $\phi$  à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} \dots \dots \dots (II.24)$$

La masse volumique d'un nanofluide pour une température de référence donnée est calculé par:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi \rho_p \dots \dots \dots (II.25)$$

**II.5.2. La chaleur spécifique ( $c_p$ ) :**

La capacité calorifique du nanofluide est donnée d'après (Xuan and Roetzel [22], Pak and Cho [21]) par l'expression:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \dots \dots \dots (II.26)$$

$(C_p)_{nf}$  : la chaleur spécifique du nanofluide.

$(C_p)_f$  : la chaleur spécifique du fluide de base.

$(C_p)_p$  : La chaleur spécifique de la particule.

**II.5.3. L'expansion thermique ( $\beta$ ) :**

Pour l'expansion thermique du nanofluide sont modélisée par :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \dots \dots \dots (II.27)$$

Il existe plusieurs modèles proposés dans la littérature pour la modélisation de la viscosité dynamique et de la conductivité thermique des nanofluides. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques modèles parmi les plus utilisés.

#### II.5.4. La viscosité dynamique ( $\mu$ ) :

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.

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température, cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide.

Différentes formules théoriques peuvent être utilisées pour la détermination de la viscosité dynamique des particules en suspension dans un fluide. Il est important de mentionner que presque toutes les relations existantes sont dérivées du travail fondamental d'Einstein.

**D'Einstein (1906) [11]** qui a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie avec le travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide.

À partir de ce résultat, il a déterminé l'expression qui permet d'obtenir la viscosité d'un fluide comportant des particules en suspension pour  $\phi < 1\%$  :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - 2.5\phi) \dots \dots \dots (II.28)$$

Pour la viscosité du nanofluide nous avons repris la relation donnée par **Brinkman (1952)** qui a proposé une relation similaire à celle d'Einstein mais valable dans une gamme de fraction volumique allant jusqu'à 4%. Son expression est la suivante [12] est :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \dots \dots \dots (II.29)$$

Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules. En prenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux particules sphériques.

**Batchelor [20]** a montré que la viscosité n’est pas seulement une fonction linéaire de la fraction volumique des particules, comme l’indique la relation d’Einstein mais une fonction non linéaire de celle-ci avec la présence d’un terme en  $\phi^2$  :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2 + \dots) \dots \dots \dots (II.30)$$

**II.5.5 La conductivité thermique (k) :**

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu’elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur elle peut indiquer clairement l’efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d’un nanofluide est calculé selon les modèles suivant :

**Maxwell (1873)** a été l’un des premiers à étudier analytiquement la conductivité thermique de nanofluide  $K_{nf}$  est donnée par l’expression suivante [13] [14]:

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \dots \dots \dots (II.31)$$

L’effet de la taille et la forme des particules n’a pas été prise en compte dans l’analyse de cette équation. Et la plupart des auteurs se servent de l’équation de **Maxwell** pour calculer la conductivité.

**Hamilton et Crosser (1962) :** [15] ont proposé une amélioration du modèle de **Maxwell** afin de tenir compte des formes des particules. Pour ce faire, ils ont introduit un facteur géométrique appelé sphéricité  $\phi$  faisant référence à la géométrie sphérique pour prendre en compte cette diversité de forme. Ce coefficient  $\phi$ , est défini comme le rapport de la surface d’une sphère ayant un volume égal à celui de la particule à la surface de la particule.

La relation obtenue est donnée par :

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \dots \dots \dots (II.32)$$

Avec :  $n$  est un facteur de forme empirique qui est défini comme :  $n = \frac{3}{\phi}$   $n = 3$  pour les particules sphériques et  $n = 6$  pour les particules cylindriques.

Pour ( $\phi = 1$ ) (particules sphériques).

Le modèle propose par **Bruggeman** semble mieux approximer certains résultats expérimentaux compare aux autres modèles [16] pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi) k_f + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}] \dots \dots \dots (II.33)$$

Avec :  $\Delta = [(3\phi - 1)^2 (\frac{k_p}{k_f})^2 (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \frac{k_p}{k_f}]$

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par **Yu et Choi** [17]. 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. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique soit plus grande que la conductivité thermique de liquide.

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \delta)^3 \phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)(1 + \delta)^3 \phi} \right] \dots \dots \dots (II.34)$$

Avec :  $k_{nf} = 0.5473 + 2.14 \times 10^{-3} t - 9.6737 \times 10^{-6} t^2$

Avec :  $\delta = 0.1$

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique considéré et les équations qui régissent le phénomène étudié. Ensuite, nous avons spécifié les conditions aux limites de toute la frontière du ce domaine.



## Chapitre III : Méthode numérique

Dans ce chapitre nous allons utiliser la méthode des volumes finis comme méthode de discrétisation cette dernière consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. La résolution du système d'équation nous permet de déterminer les champs de toutes les variables du problème considéré.

Il existe plusieurs méthodes de discrétisation sont utilisées actuellement on peut citer à titre d'exemple :

- La méthode des différences finis.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode de volume fini.

Pour résoudre le système d'équations présenté dans le chapitre précédent, nous choisis la procédure des volumes finis développée par Patankar [18]. Et modifiée par Versteeg Malalasekera [19]. Cette technique a été utilisée avec succès par plusieurs chercheurs. Elle est basée sur une approche de type volume de contrôle qui reste simple à comprendre et à implémenter physiquement sa qualité principale est la réduction des instabilités numériques des schémas aux grandes valeurs du nombre de Rayleigh.

### III.1. Notion générale sur la méthode des volumes finis :

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles

L'application de la méthode des volumes finis pour la résolution d'un problème suit les étapes suivantes :

- Bien définir le domaine d'étude et diviser ce domaine de calcul en un nombre fini et discret de volumes de contrôle dont la somme soit égale exactement au volume du domaine de calcul. On dit qu'on génère un maillage.
- Discrétisation des différentes équations régissant le phénomène. A la fin on obtient un système d'équations algébriques
- Résoudre le système algébrique final par une méthode de résolution (méthode itérative ou directe).

L'avantage de cette méthode par rapport aux autres méthodes numériques est qu'elle est conservative ; bref, tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre.

Pour expliciter l'application de cette méthode, on considère l'équation générale de transport qui s'écrit pour une propriété  $\Phi$ , comme suit :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} \text{div} (\rho \Phi u) = \text{div} (\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi}$$

En d'autres termes :

$$\left( \begin{array}{c} \text{variation de } \Phi \text{ dans un} \\ \text{élément de fluide} \end{array} \right) + \underbrace{\left( \begin{array}{c} \text{flux net de} \\ \text{l'élément de fluide} \end{array} \right)}_{\text{terme convectif}} = \underbrace{\left( \begin{array}{c} \text{variation de } \Phi \text{ due} \\ \text{à la diffusion} \end{array} \right)}_{\text{terme diffusif}}$$

Tel que :

$\Gamma_{\Phi}$  : le coefficient de diffusion.

$S_{\Phi}$  : le terme source.

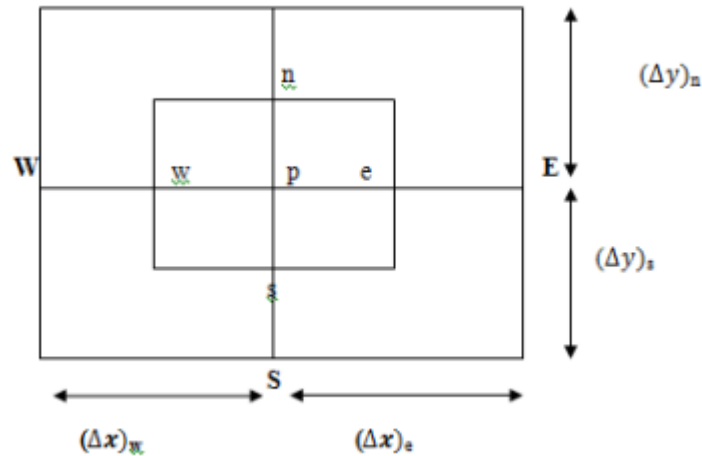
La résolution de l'équation par la méthode des volumes finis, réside essentiellement dans l'intégration de celle-ci sur un volume de contrôle :

$$\int_{cv} \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dv + \int_{cv} \text{div} (\rho \Phi u) dv = \int_{cv} \text{div} (\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) dv + \int_{cv} S dv$$

## III.2. Etapes de résolution par la méthode des volumes finis :

### III.2.1. Maillage :

Le domaine de calcul est divisé en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul, de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul.



**Figure III.1.** Schéma du volume de contrôle dans le cas bidimensionnel.

Les variables dépendantes sont stockées dans des points discrets appelés nœuds (points d'intersection des lignes du maillage) voir **figure (III.1)**. Les nœuds sont numérotés de 1 à  $N_i$ , suivant  $x$  le nœud  $(i, j)$  est appelé P, il est entouré par les nœuds E (Est), N (Nord), W (West) et S (Sud). À chaque nœud est associé un volume fini **figure (III.1)**, les faces du volume sont situées au milieu entre les nœuds, la surface de VC consiste en quatre plans, notés par des lettres minuscules correspondant à leur direction  $e$ ,  $w$ ,  $n$  et  $s$  (Exemple : la face  $w$  est au milieu entre les nœuds W et P).

Les incréments de distance  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta y_n$ ,  $\Delta x_w$ ,  $\Delta y_s$  sont définis sur la **figure (III.1)**. Les scalaires  $\phi$  (pression  $PP$ , température T) sont stockés au nœud central. Les composantes de vitesse

$u$  et  $v$  sont stockées dans des nœuds décalés. L'emploi de tels maillages entrelacés permet le calcul des gradients de pression dans les équations de quantité de mouvement, sans interpolation des pressions et le calcul des flux convectifs dans les équations sans interpolations des vitesses.

### III.2.2. Discrétisation :

- **Pression (Schéma standard) :**

Les valeurs de la pression sont stockées aux centres des cellules. Pour obtenir les valeurs des pressions aux faces, nécessaires pour la résolution de l'équation de continuité, FLUENT propose plusieurs schémas d'interpolation tel que le schéma standard.

L'interpolation s'effectue en utilisant les coefficients de l'équation de quantité de mouvement, Cette procédure fonctionne bien pour des petites variations de la pression entre les centres des cellules.

Devant les problèmes de diffusion numérique, des schémas numériques plus précis ont été testés comme celui-ci qui s'appuie sur les deux mailles amont.

Le principal problème que nous rencontrons dans la discrétisation des termes de convection est le calcul des valeurs de la propriété transportée  $\Phi$  sur les faces du volume de contrôle et son flux convectif à travers ces limites.

Afin d'obtenir les équations discrétisées pour la diffusion et le terme source nous avons introduit la différentiation centrée. Il semble évident d'essayer d'utiliser cette technique pour les termes convectifs.

Malheureusement, le phénomène de diffusion influence la distribution de la propagation de la propriété et de ses gradients dans toutes les directions, alors que la convection ne montre son influence que dans le sens de l'écoulement.

#### ❖ **Couplage vitesse pression :**

Les équations des composantes de quantités de mouvement sont couplées par la pression qui agit par les composantes de son gradient, or nous ne disposons pas d'équation propre à cette variable.

L'idée de Patankar et Spalding consiste à utiliser l'équation de continuité pour obtenir le champ de pression, car si le bon champ de pression est pris en compte dans le traitement des équations des quantités de mouvement, alors les vitesses obtenues vérifient l'équation de continuité. Donc cette dernière apparaît comme une contrainte à vérifier par le champ de pression.

Trois algorithmes sont considérés par FLUENT pour diriger la liaison vitesse-pression :

- **SIMPLE** : « Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations » : le plus robuste.
- **SIMPLEC** : « Semi Implicit Method for Pressure-linked Equation Consistent » : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.

- PISO: « Pressure Implicit Solution by Split Operator»: il est utile pour des problèmes desécoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLE. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

#### ❖ **Algorithme simple :**

La discrétisation d'une équation de transport diffusion sur un volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes ( $U_e$ ,  $U_w$ ,  $U_s$ ,  $U_n$ ). Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (sans avoir à effectuer d'interpolations). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes du fait qu'une répartition de pression ou de vitesse en "damier" est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés on préfère utiliser des grilles décalées "staggeredgrid". Une grille principale est construite sur laquelle on calcule la pression, la température et la concentration. Deux grilles décalées vers la droite et vers le haut respectivement sont utilisées pour le calcul des vitesses horizontale et verticale.

L'algorithme SIMPLE, acronyme pour « Semi-Implicit Method for Pressure Linked-Equations » permet de résoudre le système d'équations discrétisées. Cet algorithme stipule l'existence d'une relation entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, en vue de vérifier l'équation de conservation de la masse.

Le schéma représentatif de ce processus itératif est le suivant :

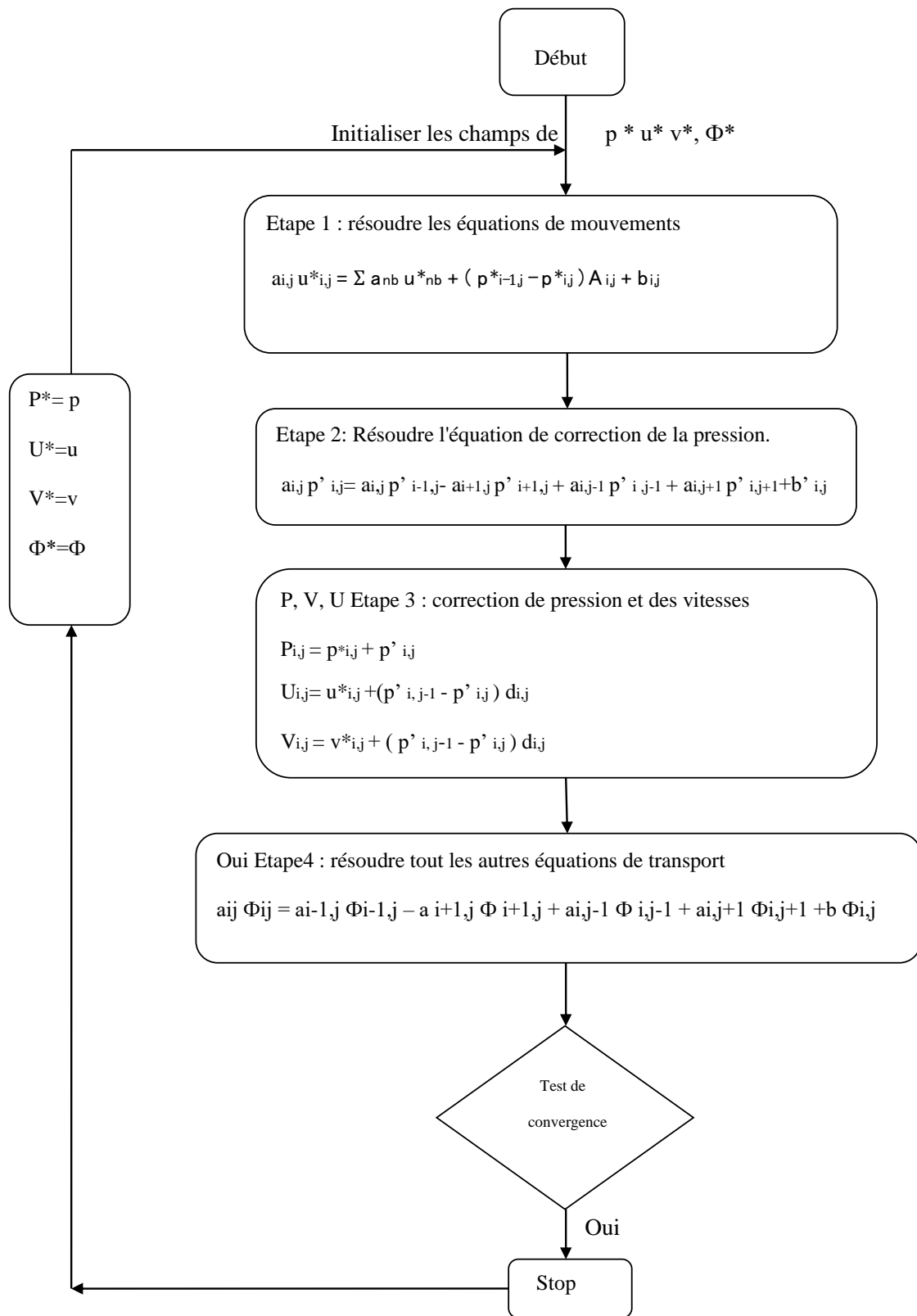


Figure III.2. Organigramme de l'algorithme SIMPLE.

$\mathbf{u}$  et  $\mathbf{v}$  : sont les deux composantes de vecteur de vitesse.

$P$  : représente la pression.

$\Phi^*$  : est définie par  $\Phi = \Phi^* + \Phi'$  avec  $\Phi'$  est une correction.

### Détails numériques utilisés dans ce travail :

#### Présentation de GAMBIT et de FLUNET :

La résolution par le logiciel de simulation numérique de l'écoulement FLUNET nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

#### III.2.3. GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit):

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 complexe (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Gambit c'est un préprocesseur intègre pour l'analyse en **CFD** (Computational **F**luid **D**ynamics), il permet de générer un maillage structure ou non structure en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

Il peut être utilisé pour construire une géométrie et lui générer un maillage éventuellement, une géométrie d'un autre logiciel de CAO peut être importée dans ce préprocesseur. Les options de génération de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structure. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Avec les outils de vérification du maillage, les défauts sont facilement détectés.

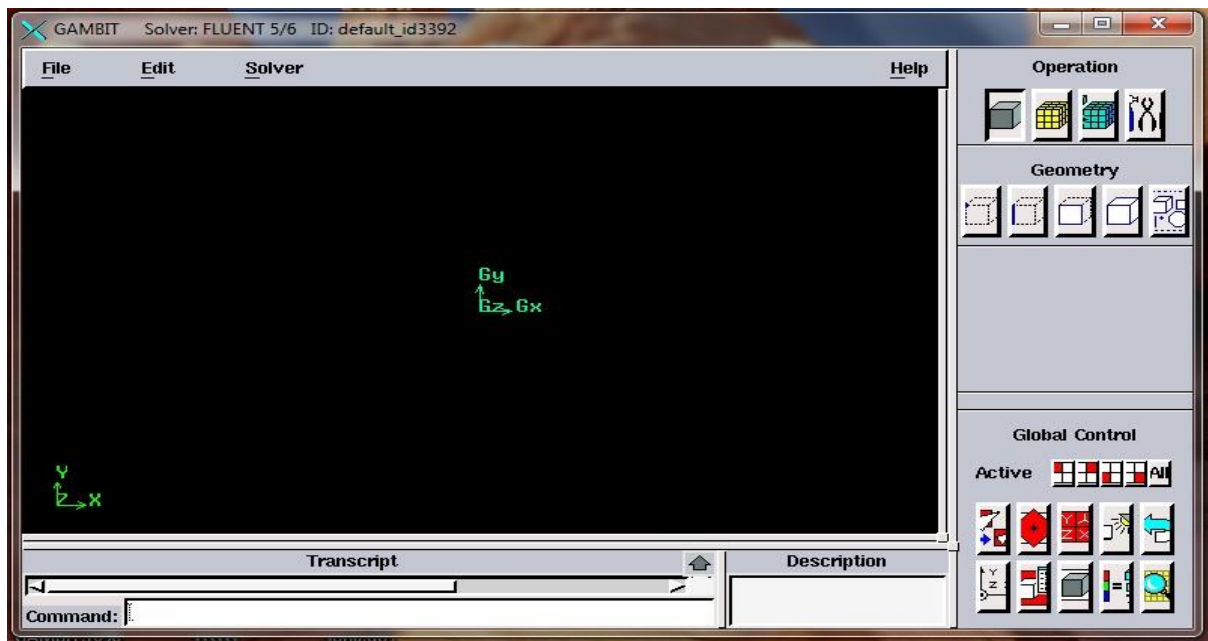


Figure III.3. l'interface de Gambit.

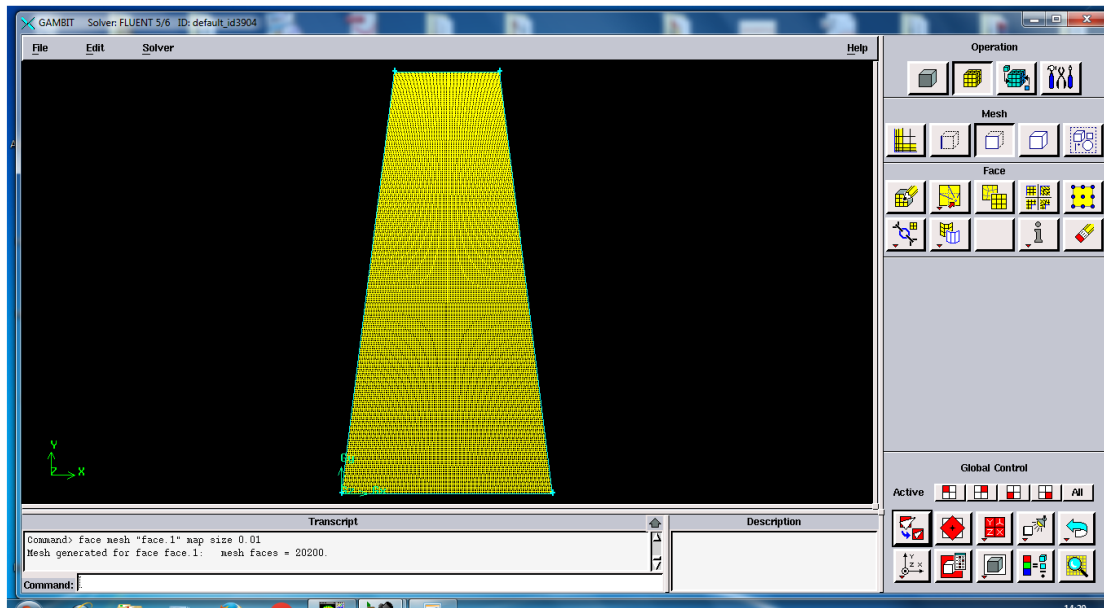
#### ❖ Choix de maillage :

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui réponde à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- Le nombre de mailles.
- La distance entre les mailles (concentration des mailles).
- La forme de la maille.
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.



Dans notre étude on choisit le maillage de (50\*50) pour réaliser notre travail.



**Figure III.4 :** Maillage de (50\*50).

#### III.2.4. FLUENT :

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

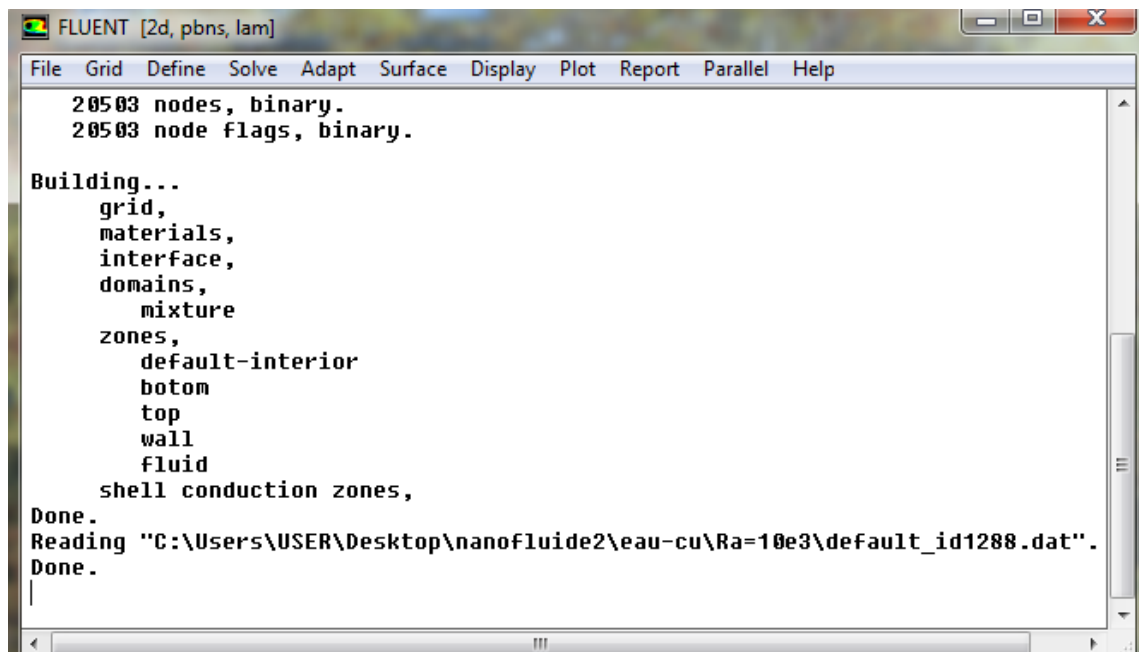
- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales.
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales.
- Des mailles (hybrides) mixtes.

Fluent est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage.

En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur la 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.

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 utilise cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle.



**Figure III.4.** L'interface du fluent.

Les schémas de discrétisation des différentes variables sont résumés dans le tableau suivant

Variable	Schéma
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Second order Upwind
Energie	Second order Upwind
Couplage pression-vitesse	Simple

**Tableau III.1.** Schéma de discrétisations.

- **Les critères de convergences :**

Une procédure est convergente si toute erreur tend à décroître au cours des itérations à une valeur  $\varepsilon$ . Elle a convergé lorsque les itérations ne produisent plus de changements significatifs sur les variables selon un critère qui doit être défini par l'utilisateur. Le critère de convergence est fixé pour l'ensemble de notre travail à un résidu normalisé inférieur ou égal à  $10^{-4}$ .

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le code de calcul FLUENT, la méthode de volume fini, également le choix de différents modèles d'interpolations puis les principales étapes à suivre sur fluent pour ce travail. La résolution qui effectuée par le logiciel FLUENT donne des résultats qui sont présentés dans le chapitre suivant.

## Chapitre IV : Résultats et discussion

Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux présentations et discussion des résultats obtenus en simulant numériquement l'écoulement bidimensionnelle dans une enceinte de forme conique tronqué de diamètre  $D_2(\text{haut})=1/2D_1(\text{bas})$  dont le rapport d'aspect  $H/D=2$ . Ce cône est rempli de différents de nano-fluide tel que (eau-cu, eau-Ag et eau- $Al_2O_3$ ) soumis à un gradient de température. Le code CFD Fluent basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour résoudre numériquement les équations gouvernant le phénomène étudié. L'objectif de cette étude est de savoir l'influence de différents nano-fluides sur l'amélioration du transfert de chaleur par convection naturelle dans la configuration de Rayleigh Benard .

### IV.1. Les propriétés de l'eau et les nano-fluides :

Nous avons utilisé les nano-fluides et leurs propriétés qui sont déterminés a partir des propriétés de l'eau avec le Cu, Ag et  $Al_2O_3$  et pour la fraction volumique  $\phi = 0.1$  qui sont présentés dans le tableau (IV.1) suivant:

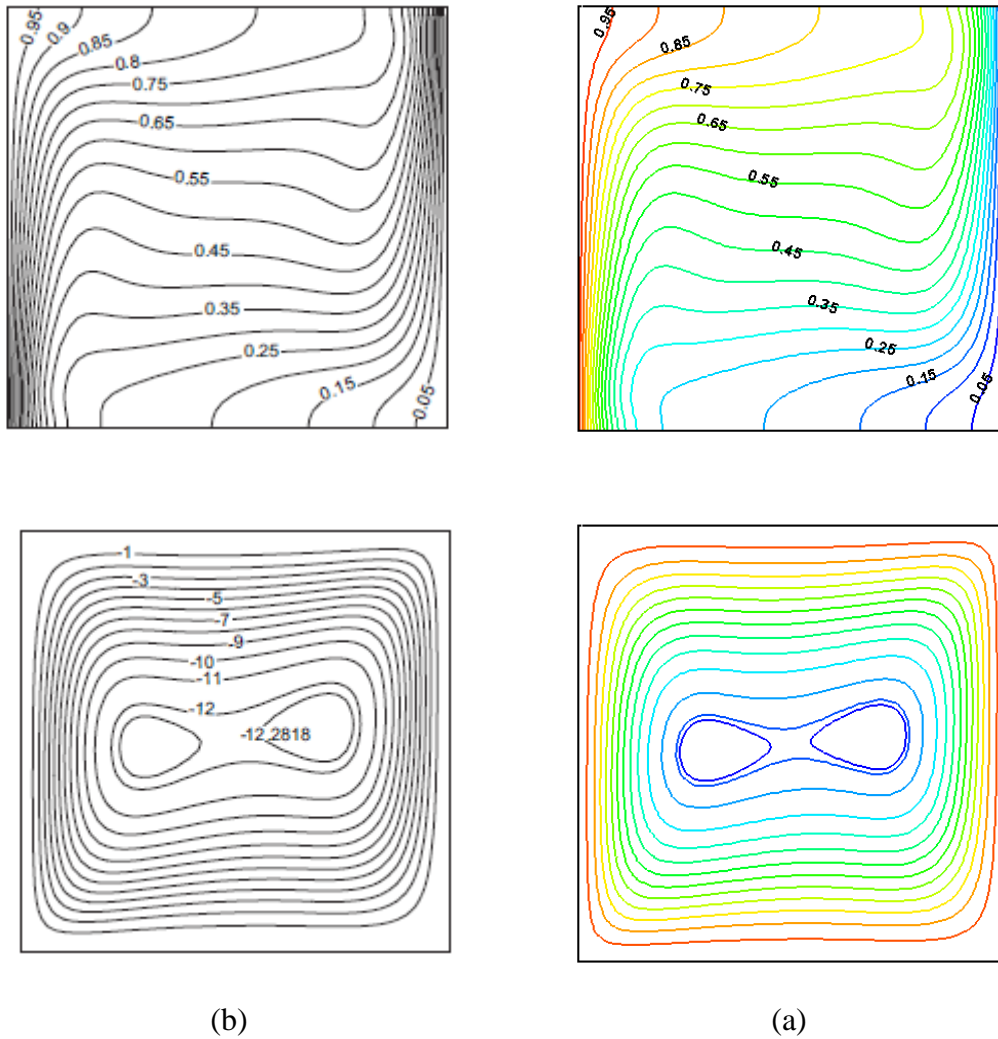
**Pour  $\phi=0.1$ :**

	$\rho$	cp	$\lambda$	$\beta$	$\mu$
eau	997.1	4179	0.613	$20 \cdot 10^{-5}$	0.001003
Nanofluide (eau-cu)	1790.69	2286.332	0.816295	$1.0855 \cdot 10^{-6}$	0.0013052
Nanofluide (eau-Ag)	898.44	464.065	0.816363	$2.0977 \cdot 10^{-4}$	0.0013052
Nanofluide (eau- $Al_2O_3$ )	1294.39	3131.898	0.807255	$1.4819 \cdot 10^{-4}$	0.0013052

**Tableau IV.1.** Les propriétés des nano-fluides utilisés.

### IV.2. Validation du code :

Pour valider notre code de calcul, une comparaison des résultats numériques obtenus a été faite concernant les contours de la fonction de courant et les isothermes (Figure IV.2) Cette comparaison montre qu'il y a un accord satisfaisant entre les résultats obtenus dans le présent travail et ceux d'Eiyad Abu-Nada et, Ali J. Chamkha [23], ce qui nous reconforte dans la fiabilité de notre code de calcul.



**Figure IV.1.** Comparaison des isothermes et des contours de la fonction de courant.

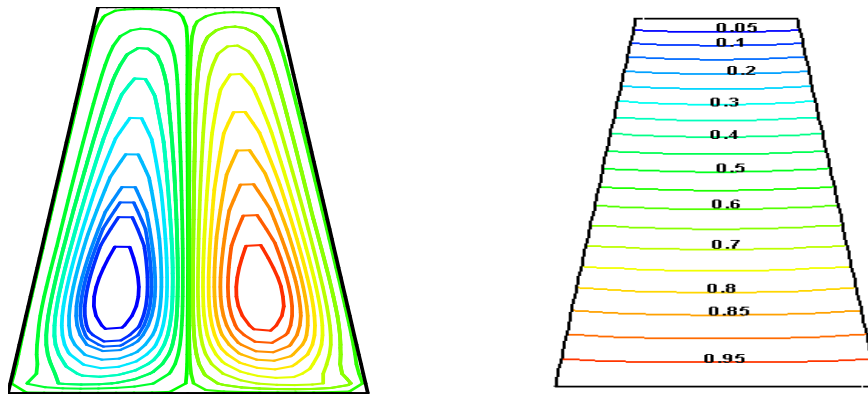
(a) Présent travail (b) Résultat d'Eiyad Abu-Nada et, Ali J. Chamkha.

La deuxième étape est consistée le lancement de la simulation en 2D dans la FLUENT à partir de la géométrie créée. Dans le FLUENT on fixe les conditions aux limites et les conditions opératoires, et nous avons choisi le modèle de Boussinesq pour calculer la variation de la densité.

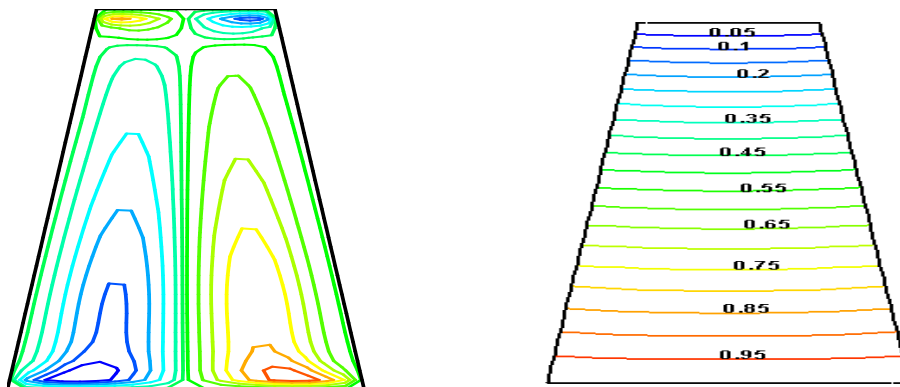
Les propriétés de l'eau et le nano-fluide : Pour cette étude nous avons les nano-fluides et leurs propriétés qui sont déterminés à partir des propriétés de l'eau avec le Cu, Ag et  $Al_2O_3$ , les propriétés sont déterminées à partir des propriétés de l'eau et les éléments suivants Cu, Ag et  $Al_2O_3$  pour la fraction volumique  $\phi = 0.1$ .

### IV.3. Le nano-fluide cu -eau :

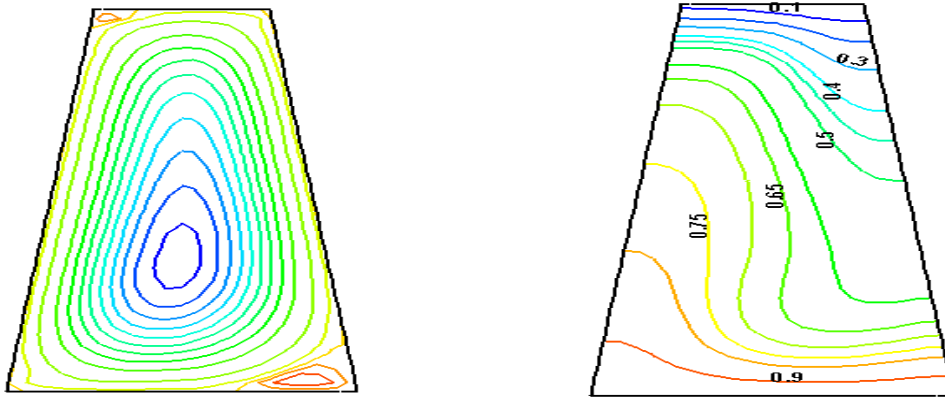
Dans ce cas, on présente les résultats d'une étude numérique du transfert de chaleur, par convection naturelle dans une enceinte conique tronqué chauffée en bas par une température caractérisée par différents des nombres de Rayleigh, et remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules du cuivre.



**Figure IV.2.** Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour  $Ra=10^3$

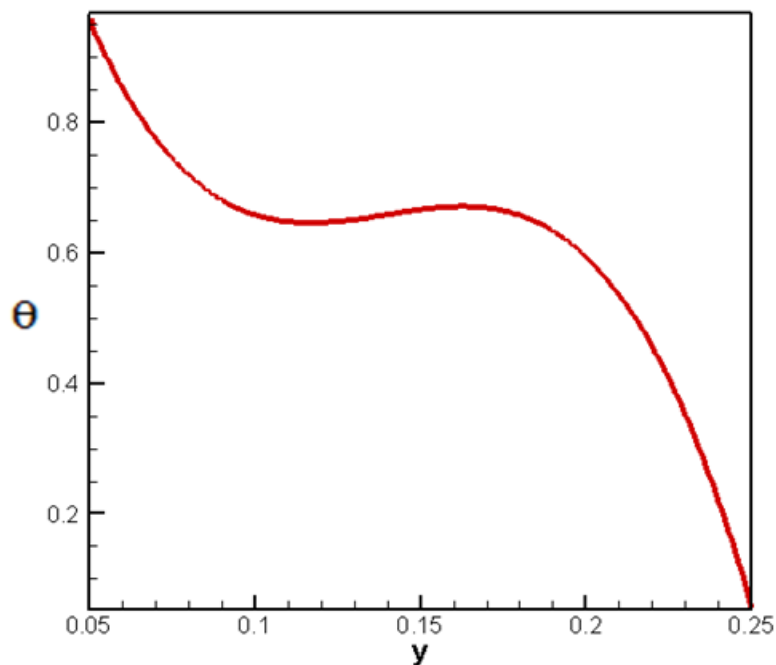


**Figure IV.3.** Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour  $Ra=10^4$



**Figure IV.4.** Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (cu-eau) pour  $Ra=10^5$

Les figures (IV.2, IV.3 et IV.4) représentent les champs de température et les lignes de courants respectivement pour le nano- fluide (eau-cu), aux différentes valeurs de nombre de Rayleigh tel que  $Ra=10^3, 10^4$  et  $10^5$ . Les résultats montrent que la déviation des isothermes augmente quand le nombre de Rayleigh augmente. Ce dernier est visible pour ( $Ra=10^5$ ). D'autre part, l'augmentation du nombre de Rayleigh provoque l'apparitions de deux cellules de vortex pour  $Ra=10^4$  et  $10^5$ .



**Figure IV.5.** Profils de Température adimensionnelle  $\theta$  à la hauteur du cône pour  $Ra=10^5$

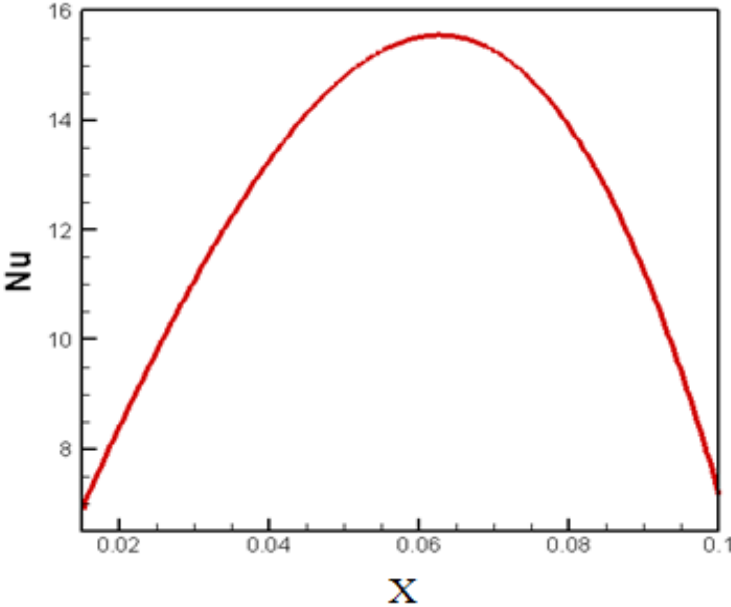


Figure IV.6. Profil du nombre de Nusselt le long de la paroi inferieur du cône pour Ra=10<sup>5</sup>

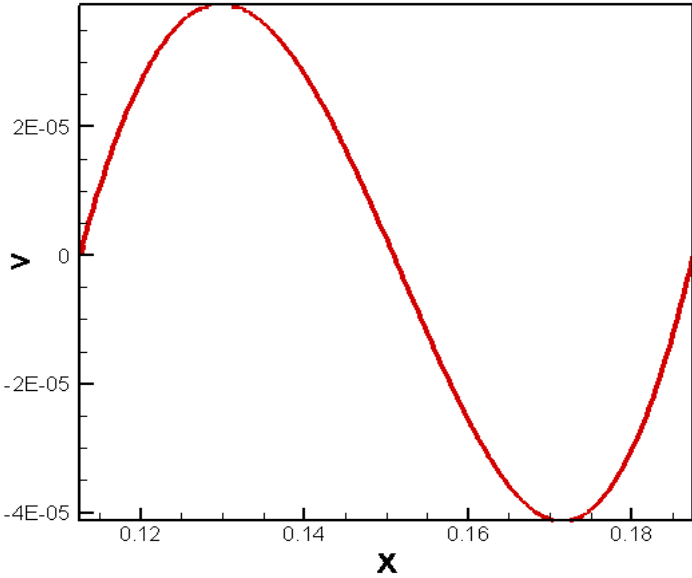
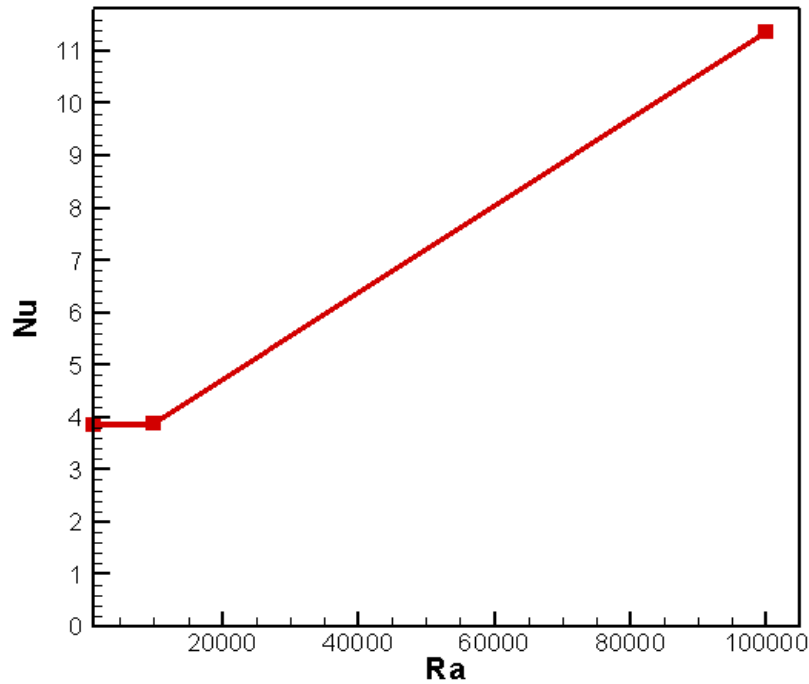


Figure IV.7. La vitesse verticale au milieu du cône pour Ra=10<sup>5</sup>





**Figure IV.8.** L'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour le nano-fluide (cu-eau)

Les figures (IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8) présentent le profil de température adimensionnelle  $\theta$  à la hauteur du cône, le profil du nombre de Nusselt le long de la paroi inférieure du cône, la vitesse verticale au milieu du cône et l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour  $Ra=10^5$ . On remarque que le transfert de chaleur influencé par la température et l'effet du nano-fluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé. Pour un nombre de Rayleigh  $Ra=10^5$  le nombre de Nusselt atteint au 11,6.

L'analyse de la figure (IV.8) montre que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

#### **IV.4. Le nano-fluide Ag -eau :**

Dans le deuxième cas, nous avons utilisé le nano-fluide Ag – eau, pour voir son influence sur le transfert de chaleur.

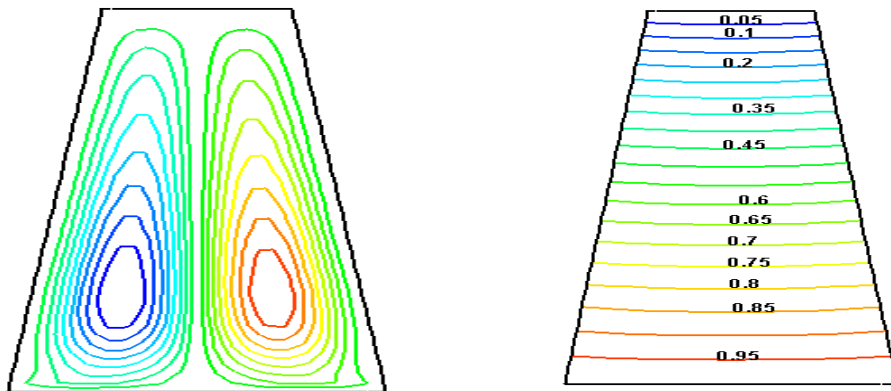


Figure IV.9. Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour  $Ra=10^3$

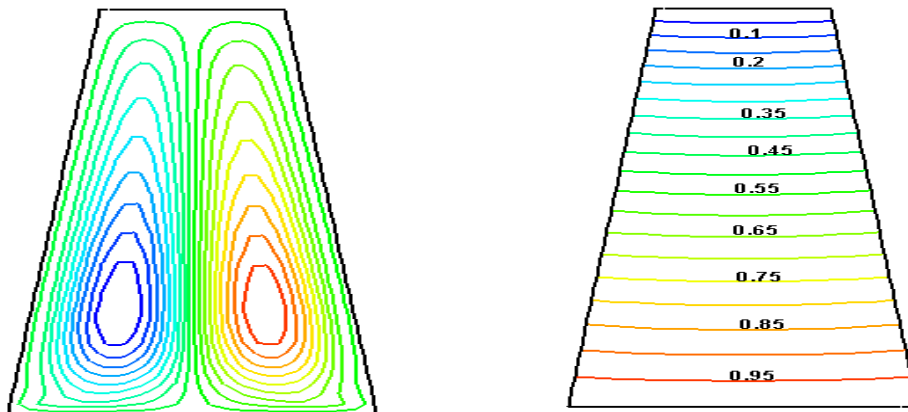


Figure IV.10. Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour  $Ra=10^4$

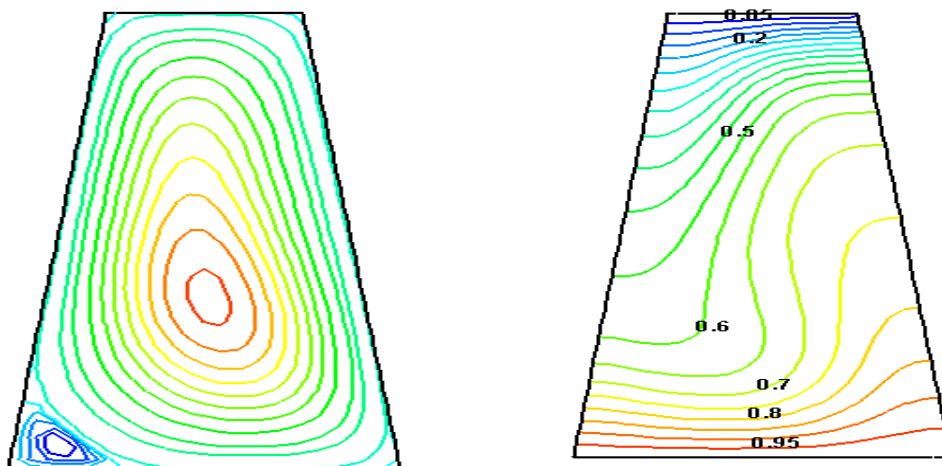
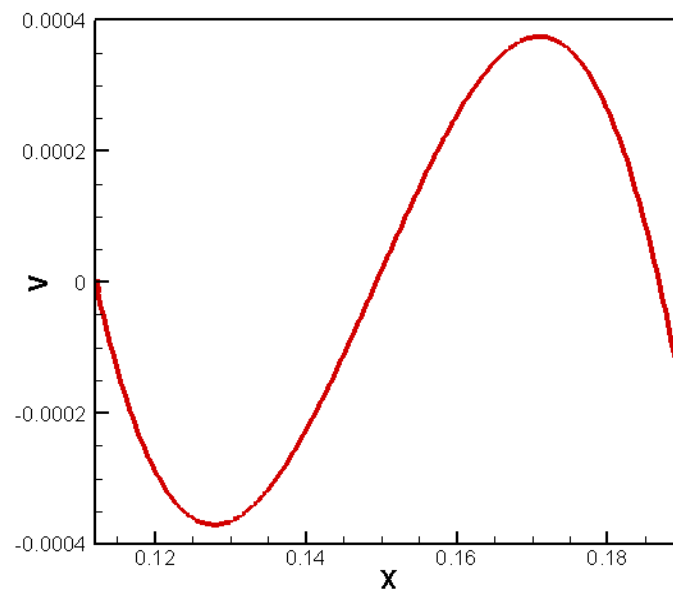
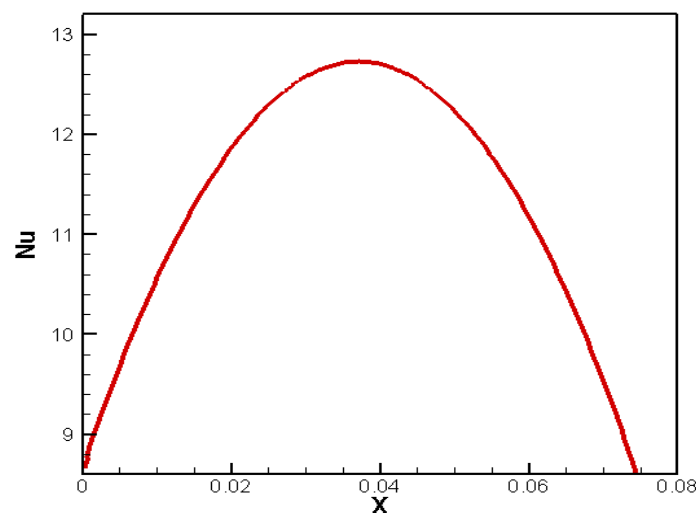


Figure IV.11. Lignes de courant et isothermes relatives au nano-fluide (Ag-eau) pour  $Ra=10^5$

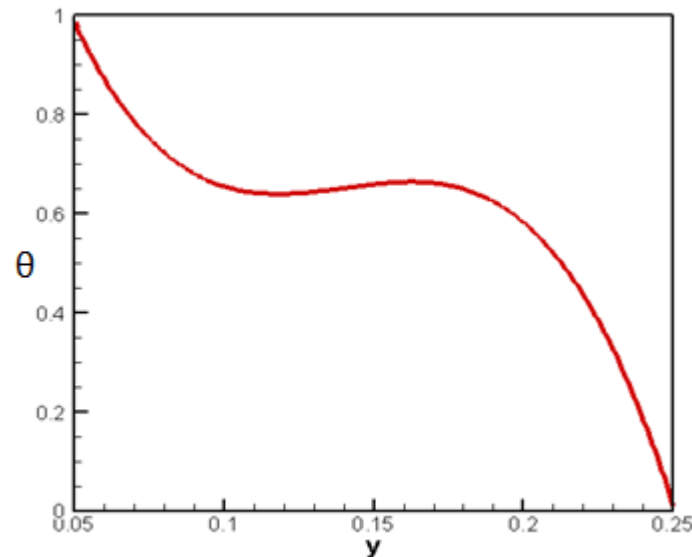
Les figures (IV.9, IV.10 et IV.11) représentent les champs de température et les lignes de courants respectivement pour le nano- fluide (Ag-eau), aux différentes valeurs de nombre de Rayleigh tel que  $Ra = 10^3, 10^4$  et  $10^5$ . Ces derniers sont caractérisés par l'apparition d'une zone de recirculation s'installe au bas du cône, juste au coin gauche pour  $Ra = 10^5$ , tandis que pour les nombres de Rayleigh  $Ra=10^3$  et  $10^4$ , on remarque deux cellules symétriques pour les lignes de courants. Les lignes de températures pour  $Ra=10^3$  et  $10^4$  sont des lignes droites parallèles dans toutes la surface du cône. Une dénivellation des lignes de températures pour le nombre de Rayleigh  $Ra = 10^5$ .



**Figure IV.12.** La vitesse verticale au milieu du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au nano-fluide (Ag-eau)



**Figure IV.13.** Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inferieur du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au nano-fluide (Ag-eau)

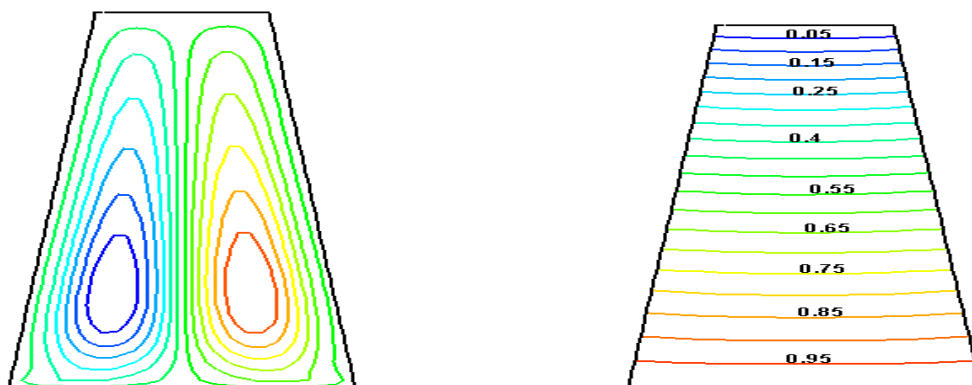


**Figure IV.14.** Profils de température adimensionnelle  $\theta$  à la hauteur du cône pour  $Ra=10^5$

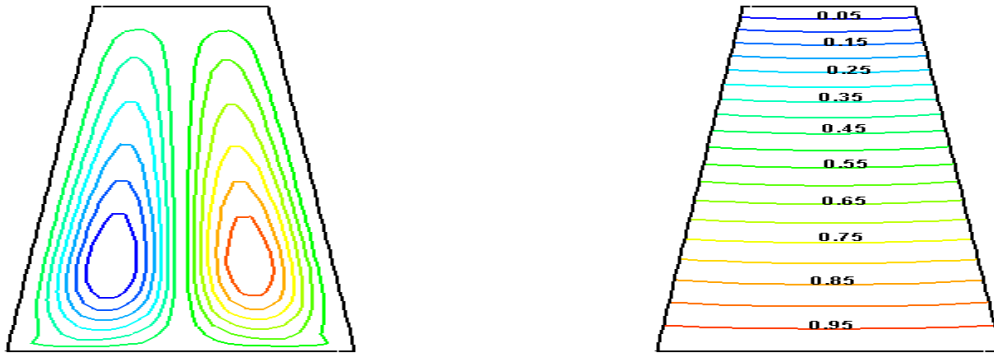
Le nombre de Nusselt est utilisé comme indicateur de l'amélioration du transfert de chaleur où l'augmentation du nombre de Nusselt correspond à une amélioration du transfert de chaleur. L'épaisseur de la couche limite thermique est responsable de la diminution de la température à la surface chauffée, d'où la diminution du nombre de Nusselt. La vitesse verticale augmente près de la paroi de la cavité chauffée en raison des effets de flottabilité thermique et diminue près de la cavité de la paroi refroidie. Ceci est illustré dans les figures (IV.12), (IV.13) et (IV.14).

#### IV.5. Le nano-fluide $Al_2O_3$ -eau :

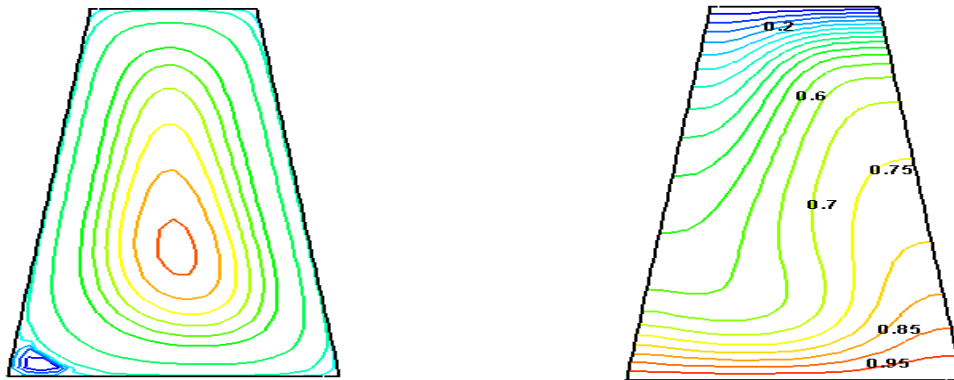
Dans le troisième cas nous avons utilisé le nano-fluide ( $Al_2O_3$  -eau) pour le comparer avec les deux nano-fluides que nous utilisons auparavant.



**Figure IV.15.** Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau) pour  $Ra=10^3$



**Figure IV.16.** Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour  $\text{Ra}=10^4$



**Figure IV.17.** Lignes de courant et isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour  $\text{Ra}=10^5$

Les figures (IV.15), (IV.16) et (IV.17) illustrent les lignes de courants et les isothermes adimensionnelle relatives au nano-fluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour les valeurs du nombre de Rayleigh  $\text{Ra}=10^3, 10^4$  et  $10^5$ , on remarque qu'un vortex s'crée au voisinage de la paroi inferieur (paroi chaude) au coin gauche , avec des déformations des lignes des isothermes pour  $\text{Ra}=10^5$ . Pour  $\text{Ra}=10^3$  et  $\text{Ra}=10^4$  la même remarque que le nano-fluide (Ag-eau).

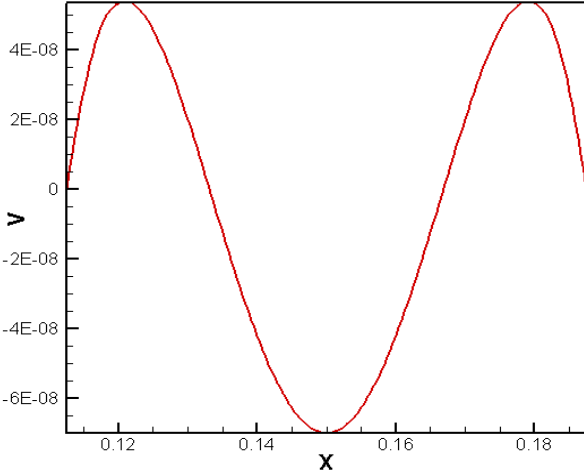


Figure IV.18. La vitesse verticale au milieu du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau)

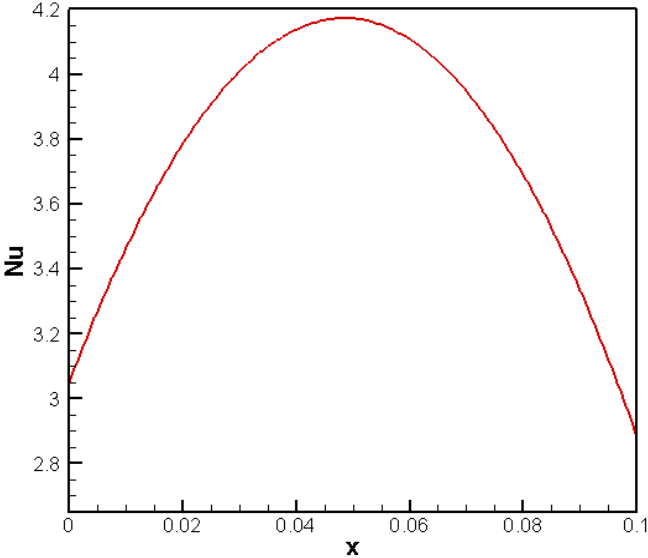
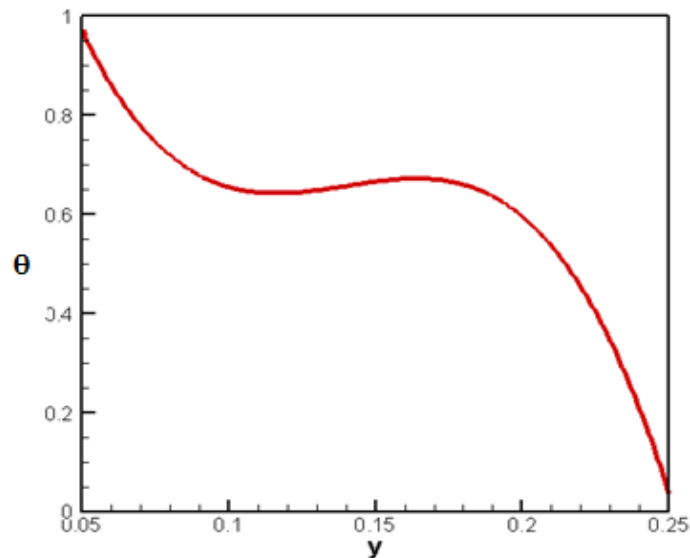


Figure IV.19. Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inferieur du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau)

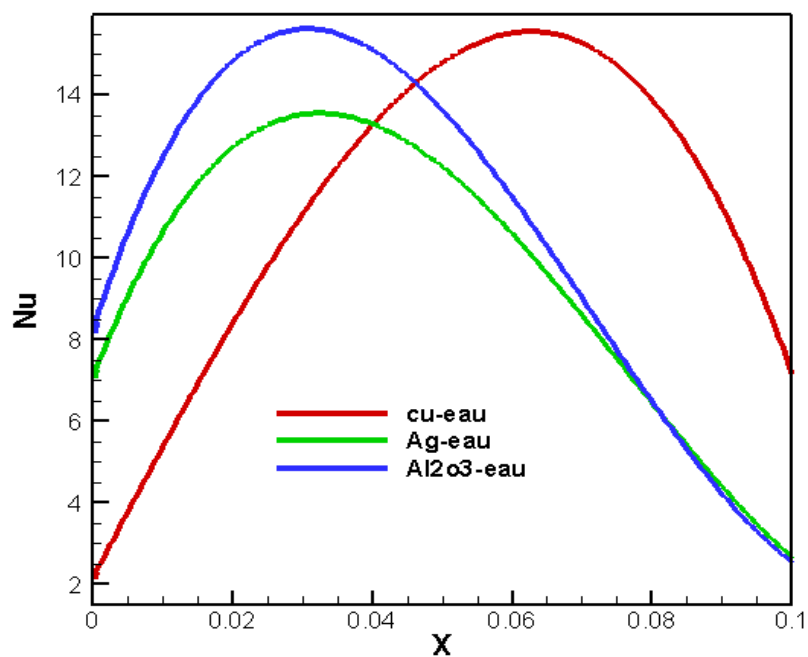


**Figure IV.20.** Profils de température adimensionnelle  $\theta$  à la hauteur du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au nano-fluide ( $Al_2O_3$ -eau)

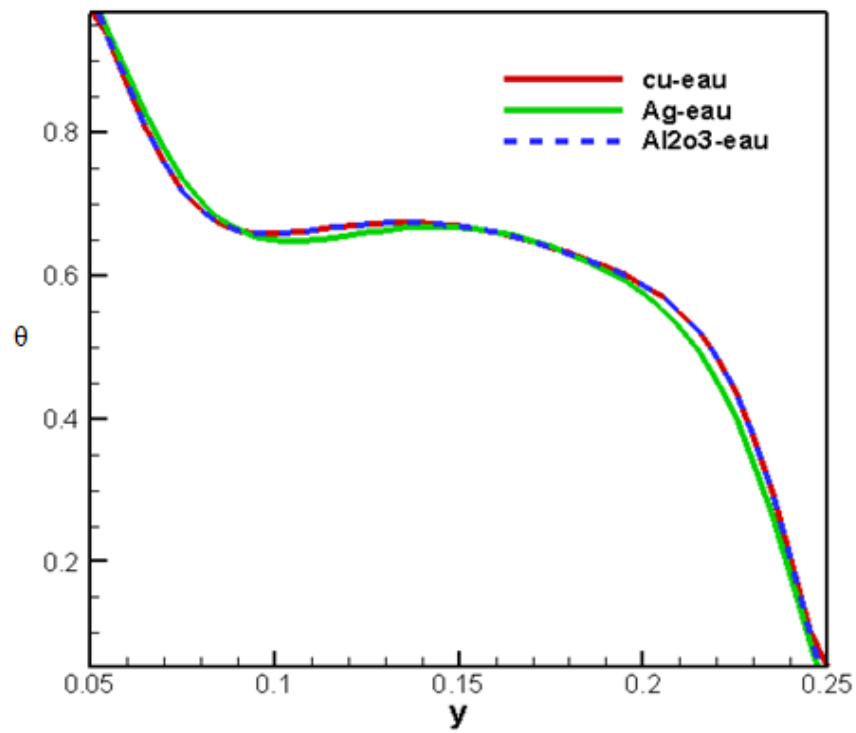
Pour les figures (IV.18), (IV.19) et (IV.20) même remarque physique que le nano-fluide (Ag-eau), mais quantitativement différente.

#### IV.6. Les trois nano-fluides :

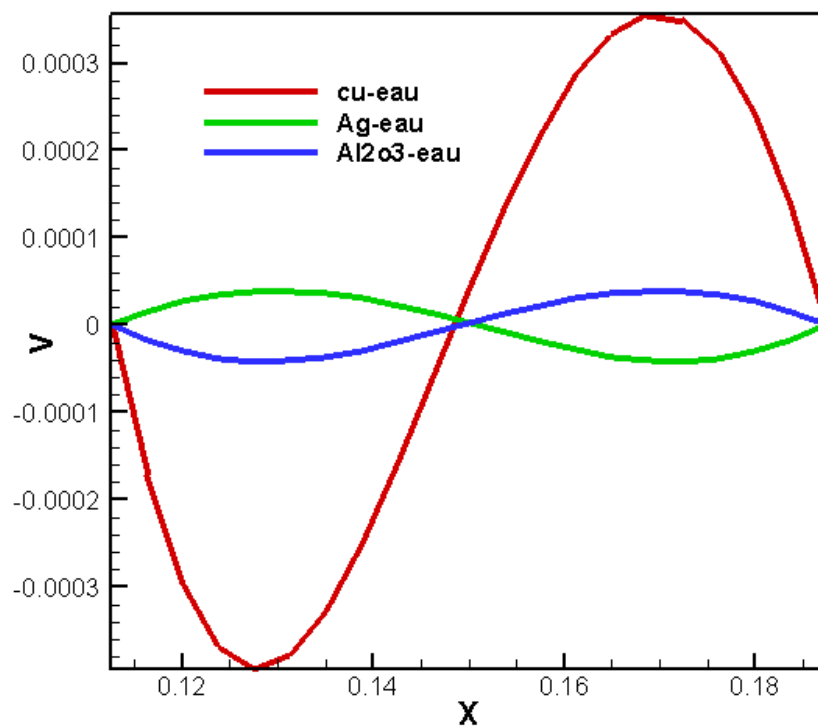
Dans ce cas, on rassemble les paramètres de trois fluides dans le même repère pour faire une comparaison entre les trois fluides.



**Figure IV.21.** Profil du nombre de Nusselt le long de paroi inférieure du cône pour  $Ra=10^5$  relatives aux trois nano-fluides (Cu-eau, Ag-eau et  $Al_2O_3$ )

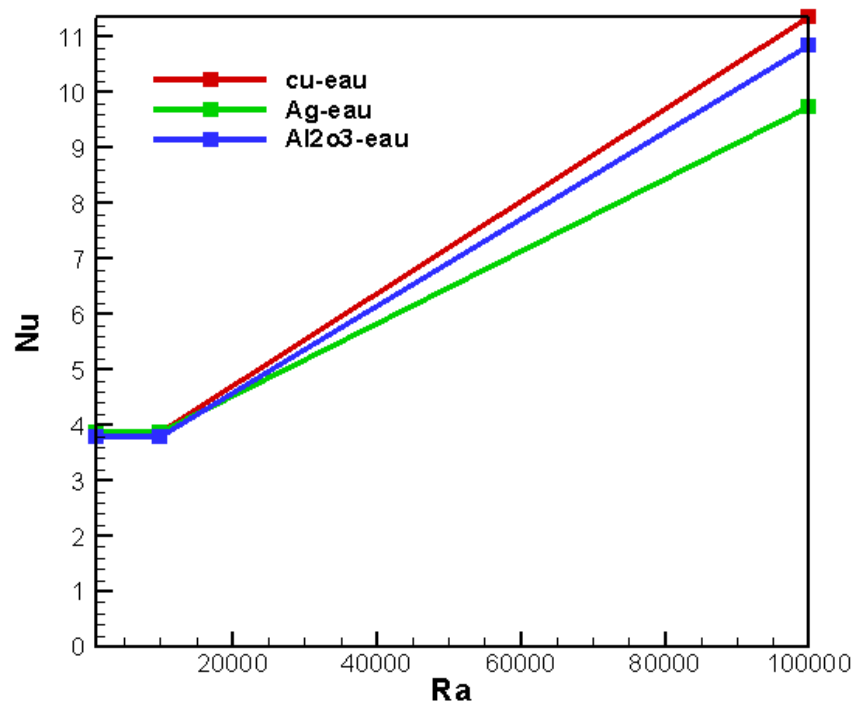


**Figure IV.22.** Profil de température adimensionnelle  $\theta$  à la hauteur du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au trois nano-fluides (Cu-eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



**Figure IV.23.** Profil de la vitesse verticale au milieu du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au trois nano-fluides (cu-eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)





**Figure IV.24.** L'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour les trois nano-fluides (Cu –eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau)

La figure (IV.21) présente le profil du nombre de Nusselt le long de paroi inférieure du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au trois nano-fluides (cu-eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

On note que la valeur du nombre de Nusselt pour les deux nano-fluides (cu-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau) supérieure au nano-fluide (Ag-eau), ce qui explique une amélioration du transfert thermique par convection pour les deux fluides. Nous préférons le nano-fluide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à Cu, car il accepte un nombre de Rayleigh plus élevé que Cu.

Concernant le profil de température adimensionnel  $\theta$  à la hauteur du cône pour  $Ra=10^5$ , on retrouve quasiment les mêmes profils, montre la figure (IV.22).

La figure (IV.23) présente le profil de la vitesse verticale au milieu du cône pour  $Ra=10^5$  relatives au trois nano-fluides (Cu-eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). On remarque que le nano-fluide (Cu-eau) fluctue avec une amplitude plus élevée que les autres.

La figure (IV.24) montre l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh le long de la paroi inférieure du cône pour les trois nano-fluides (Cu –eau, Ag-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau). On remarque que le nombre de Nusselt par rapport au nombre de Rayleigh pour le nano-fluide (Cu - eau) évolue plus haut que les autres.

## Conclusion générale

On a présenté une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans un récipient de forme conique tronqué remplie chaque fois, de trois nano-fluides qui sont (Cu-eau, Ag-eau et  $Al_2O_3$ -eau). Les configurations géométriques est de forme conique tronqué. Les parois inclinées sont thermiquement isolées où la source de chaleur est située sur la paroi inférieure du récipient conique.

Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ( $Ra=10^3, 10^4$  et  $10^5$ )

En se basant sur les approximations de Boussinesq, on a proposé le modèle mathématique décrivant notre problème. Une modélisation du problème, en 2D, a été menée en utilisant le code FLUENT, qui se base sur la méthode des volumes fins.

Les résultats trouvés dans ce travail nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Nous préférons le nano-fluide  $Al_2O_3$  à Cu, car il accepte un nombre de Rayleigh plus élevé que Cu.
- On note que la valeur du nombre de Nusselt pour les deux nano-fluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) supérieure au nano-fluide (Ag-eau), ce qui explique une amélioration du transfert thermique par convection pour les deux fluides.
- Quand le nombre de Rayleigh augmente, le nombre Nusselt augmente en parallèle.

**Bibliographies**

- [1] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46 (19), 2003, pp.3639-3653.
- [2] Jou R.Y., Tzeng S.C., Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. *International communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33 (6), 2006, pp. 727–736.
- [3] Oztop H.F., Abu-Nada E, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol 29 (5), 2008, pp. 1326–1336.
- [4] Aminossadati S. M., Ghasemi B., Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol.28, 2009, pp. 630–640.
- [5] Ben-Mansour R., Habib M.A., Use of nanofluids for improved natural cooling of discretelyheated cavities, *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, pp.1326–1336.
- [6] Sun Q., Pop I., Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated with nanofluids with flush mounted heater on the wall, *international scientific journal thermal science*, Vol.50, 2011, pp. 2141–2153.
- [7] Garoosi F., Bagheri G., Talebi F., Numerical simulation of natural convection ofnanofluids in a square cavitywith several pairs of heaters and coolers (HACs) inside, *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.67, 2013, pp. 362–373.
- [8] Heris S.Z., Pour M.B., Mahian O., Wongwises S., A comparative experimental study on the natural convection heat transfer of different metal oxide nanopowders suspended in turbine oil inside a inclined cavity, *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, 2014, pp. 231–238.
- [9] Abu-Nada E., Oztop H.F., Pop I., Buoyancy induced flow in a nanofluid filled enclosure partially exposed to forced convection, *Superlattice. Microst.* Vol.51 , 2012, pp. 381–395.
- [10] Amin Behzadmehr Hassan Azarkish An Introduction to the NanoFluid universty of Sistan and Baluchestan, 2000.

- [11] K. Khanafer, K. Vafai et M. Lightstone, 'Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, N°19, pp. 3639 – 3653, 2003.
- [12] A. Einstein. *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. 1956.
- [13] M. Salari, M. M. Tabar, A. M. Tabar et H. A. Danesh, Mixed convection of nanofluid flows in a square lid-driven cavity heated partially from both the bottom and side walls, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 62 (2012)158-177.
- [14] G. K. Batchelor. Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction. *Journal of Fluid Mechanics*, 74(1) :1 – 29, 1976.
- [15] Maxwell , J.C., 'A Treatise on Electricity and Magnetism', Clarendon Press, U.K, (1891)
- [16] R. L. Hamilton et O. K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two-component system. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3) :187 – 191, 1962.
- [17] R.L. Hamilton et O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), 187- 191, 1962.
- [18]S. V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow* McGraw- hill Book Company 1980.
- [19] H.Versteeg et W Malalasekra. *An introduction to computational fluid dynamics essex: Longman scientific & technical* 257p (ISBN 0582218845) 1995.
- [20] H.C. Brinkman, the viscosity of concentrated suspension and solution, *J. of Chem. Phys.*, 20 (1952) 571 – 581.
- [21] B.C. Pak and Y.I. Cho. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151-170, 1998.
- [22] Y. Xuan and W. Roetzel. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701-3707, 2000.
- [23] Eiyad Abu-Nada et, Ali J. Chamkha / *International Journal of Thermal Sciences* 49 ( 2010 ) 2339e2352 .