



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energetique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Radja Mebrek

Le : lundi 20 juin 2022

L'effet des dimensions de milieu poreux sur l'échange thermique dans une cavité triangulaire

Jury :

Mr	Adel BENCHABANE	Pr	Université de Biskra	Président
Mr	Noureddine BELGHAR	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr	Salah GUERBAAI	MCA	Université de Biskra	Examineur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents pour leur sacrifices, leur soutien, leur conseils et leur prières tout au long de mes études.

A mes sœurs et mes frères pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement permanent ont été d'une grande aide.

*A mes nièces (**Yasmine et Farah**) et mon neveu (**Samy**).*

Toute ma famille

Toutes mes amies

Radja

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord le Dieu qui m'a donné le courage et la volonté pour réaliser ce mémoire.

*Je tiens à exprimer tout ma reconnaissance à mon encadreur **Pr.Noureddine BELGHAR** ; je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*Mes remerciements s'adressent aussi au **Mr. Adel BENCHABANE** pour avoir accepté de présider le jury, et au **Mr.SalahGUERBAAI** d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail.*

*Je remercie le doctorant **Momen Sami Saleh** pour son aide afin de réaliser ce projet.*

Enfin, je remercie toute personne aide moi de près ou loin pour réalisé ce travaille.

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciement	ii
Sommaire	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	ix
Nomenclature	xvi
Introduction Générale	1

Chapitre I : Analyse bibliographique

I.1. Introduction	4
I.2. Synthèse bibliographique.....	4
I.3. Conclusion.....	17

Chapitre II : Modélisation thermo-physique de nano fluide et généralité sur les milieux poreux

II.1. Introduction.....	19
II.2. Généralité sur le transfert de chaleur.....	19
II.2.1. modes du transfert de chaleur.....	19
II.2.1.1. transfert de chaleur par conduction	19
II.2.1.2. transfert de chaleur par convection	20
II.2.1.3. transfert de chaleur par rayonnement.....	21
II.3. Généralité sur les milieux Poreux.....	22
II.3.1. Définition	22
II.3.1.1. Les domaines d'application.....	24
II.3.2. Les paramètres que caractérisant milieu poreux	24
II.3.2.1. La porosité	24
II.3.2.2. La perméabilité.....	25

II.3.2.3. La surface spécifique.....	25
II.3.2.4. Tortuosité	25
II.3.2.5. Volume élémentaire représentatif.....	26
II .3.3. Modèles d'écoulement en milieu poreux	26
II.3.3.1. La loi de Darcy	26
II.3.3.2. La loi de Darcy-Forchheimer.....	27
II .3.3.3. La loi de Darcy-Brinkman.....	28
II.3.3.4. la loi de Darcy-Brinkman –Forchheimer	28
II.3.4. Transport en milieu poreux.....	28
II.4. Généralités sur les nano fluides :.....	29
II.4.1. Définition	29
II.4.1.1. Les nanoparticules	30
II.4.1.1.1. Types de nanoparticules	31
II.4.1.1.2. Fabrication de nanoparticules.....	31
II .4.2. Les applications des nano fluides	32
II. 4.3. Les avantages des nano fluides.....	32
II.4.4. Les inconvénients des nano fluides	33
II .4.5/ Fabrication des nano fluides	33
II. 4.6. Propriétés thermo-physiques des nano fluides et les modèles utilisés	34
II. 4.6.1. La fraction volumique	34
II.4.6.2. La masse volumique.....	34
II.4.6.3. La chaleur spécifique	35
II.4.6.4. La viscosité dynamique	35
II.4.6.5. La conductivité thermique	36
II.4.6.5.1. Les modèles théoriques	37
II.4.6.6. Coefficient d'expansion volumique.....	38
II.4.7. Nano fluides hybrides	39
II .5. Conclusion.....	40

Chapitre III : Modélisation Mathématique

III.1. Introduction	42
III.2. Définition de géométrie.....	42
III.3. Equations gouvernantes	42

III.3.1. la vitesse de Darcy et l'équation de continuité	43
III.3.2. Equation de quantité de mouvement	43
III.3.3. Equation d'énergie en milieu poreux	43
III.4. Hypothèses simplificatrices.....	44
III.4.1. Approximation de Boussinesq-Oberbeck	44
III.5. Equations du problème	45
III.5.1. L'équation de continuité	45
III.5.2. Equation de la quantité de mouvement	45
III.5.3. Equation d'énergie en milieu poreux	45
III.6. Les nombres adimensionnels	46
III.6.1. Le nombre de Grashof	46
III.6.2. Le nombre de Rayleigh	46
III.6.3. Le nombre de Nusselt	46
III.6.4. Nombre de Prandtl.....	47
III.6.5. Nombre de Darcy.....	47
III.7. Les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et fluide de base	47
III.8. Conditions aux limites	48
III.9. Conclusion	48

Chapitre IV : Simulation Numérique

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Procédure du calcul	51
IV.2 .1. Menu principal du logiciel.....	51
IV.2 .2. Création de la géométrie	53
IV.2 .3. Le maillage	56
IV.2.3.1. Méthode numérique et logiciels	57
IV.2.3.1.1. Méthode des volumes finis	57
IV.2 .4. Configuration	58
IV.3. Conclusion	61

Chapitre V : Résultats et Discussion

V.1. Introduction	63
V.2. La convergence	63

V.3. Résultats et interprétation	64
V.4. Effet de la variation des différents paramètres sur la température et la vitesse	65
V.5. les champs de la température	65
V.6. les champs de la vitesse	66
V.7. Effet de la fraction volumique sur le Nombre de Nusselt Moyen.....	66
V.8. Conclusion.....	71
Conclusion Générale.....	73
Bibliographie	74
Annexe	78

Liste des tableaux

Chapitre II : Modélisation thermo-physique de nano fluide et généralité sur les milieux poreux

Tableau II.1 : Propriétés de quelques matériaux poreux

Chapitre III : Modélisation Mathématique

Tableau III.1 : Les propriétés thermo physiques de nanoparticules et fluide de base

Tableau III.2 : Conditions aux limites

Chapitre V : Résultats et Discussion

Tableau V.1 : Les propriétés thermo physiques des nano fluides hybrides

Tableau V.2 : Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^3$

Tableau V.3 : Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^4$

Tableau V.4 : Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^5$

Tableau V.5: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

Tableau V.6 : Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

Tableau V.7: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

Tableau V.8: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

Tableau V.9: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

Tableau V.10: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

Tableau V.11: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

Tableau V.12: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

Tableau V.13: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

Tableau V.14: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

Tableau V.15: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

Tableau V.16: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

Tableau V.17: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

Tableau V.18: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

Tableau V.19: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

LISTES DES FIGURES

Chapitre I : Analyse bibliographique

Figure I.1: Le schéma du problème considéré, Benmerkhi Meriem

Figure I.2: géométrie de problème considéré, BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir (2019)

Figure I.3: Schéma de l'échangeur, CHARLES VILLEMURE (2007)

Figure I.4 : Géométrie du système, BOULECHFAR Hichem

Figure I.5 : Situation physique et système de coordonnées, G. Degan (2001)

Figure I.6 : Schéma représentant les configurations étudiées et les conditions aux limites, Salhi Hichem (2015)

Figure I.7 : Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites, E. BELAHMADI, R. BESSAÏH

Figure I.8 : Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites,
EL KHAOUDI FATIMA et al

Figure I.9 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles, Mahdi Benzema et al. (2021)

Figure I.10 : Schéma de l'appareil expérimental de transferts thermiques convectifs,
E. EBRAHIMNIA-BAJESTAN et al. (2015)

Figure I.11 : Géométrie du problème, SALHI MASSINISSA et MAMMERI LAMIA (2019)

Figure I.12 : Représentation schématique du modèle physique, Hamadi hamza et Nassou Mourad (2020)

Figure I.13: Domaine physique étudié, I. FERSADOU, H. KAHALERRAS (2016)

Figure I.14 : Configuration de l'étude, Cimpean et al. (2020)

Figure I.15 : Modèle physique du problème proposé, Raza et al. (2016)

Chapitre II : Modélisation thermo-physique de nano fluide et généralité sur les milieux poreux

Figure II.1 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Figure II.2 : Exemple d'un milieu poreux

Figure II.3 : Exemples de structures poreuses 3D observées à l'échelle du pore

Figure II.4 : Exemples de milieux poreux naturels (d'après " Convection in porous media)

Figure II.5 : Les deux types de la porosité

Figure II.6: Schématisation du Volume Élémentaire Représentatif

Figure II.7 : Dispositif expérimentale de Darcy

Figure II.8 : transport en milieu poreux

Figure II.9 : Représentation schématique de nano fluides

Figure II.10 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone (Bang et Chang, 2005)

Figure II.11 : Procédé de synthèse du nano fluide en une seule étape

Chapitre III : Modélisation Mathématique

Figure III.1 : Géométrie du problème

Figure III.2 : Conditions aux limites

Chapitre IV : Simulation Numérique

Figure IV.1 : Fenêtre lancement du logiciel

Figure IV.2 : Menu principal de Workbench

Figure IV.3 : Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide

Figure IV.4 : Création d'un projet en mécanique de fluide

Figure IV.5 : Création du modèle de la géométrie

Figure IV.6 : Création du modèle (plan de vue)

Figure IV.7 : Création d'esquisse

Figure IV.8 : Création d'esquisse

Figure IV.9 : la définition des surfaces

Figure IV.10 : le maillage utilisé

Figure IV.11 : les détails de« Maillage »

Figure IV.12 : Volume de contrôle bidimensionnel

Figure IV.13 : Model (laminaire, équation de l'énergie)

Figure IV.14 : Création les données du nano fluide hybride

Figure IV.15 : Création les données de milieu poreux

Figure IV.16 : Condition aux limite –bottom- Température imposée

Figure IV.17 : Condition aux limite –left- Température imposée

Figure IV.18 : Condition aux limite –right- Température imposée

Chapitre V : Résultats et Discussion

Figure V.1 : Présentation de l'évolution des résidus de calcul (Convergence de la solution)

Figure V.2: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure V.3: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Annexe

Figure A.1 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.2 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.3: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.4 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.5 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.6: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.7: contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.8: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.9 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.10: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.11 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.12: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.13 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.14: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.15 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.16 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.17 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.18 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.19 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.20 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.21 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.22: contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure A.23 : contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.1: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.2: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$; $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.3: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.4: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.5: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.6: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.7: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.8: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.9: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.10: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.11: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.12: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.13: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.14: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.15: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.16: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.17: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.18: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.19: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.20: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.21: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.22: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Figure B.23: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Nomenclature

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

T_p : Température de la surface du solide (°C).

T_∞ : Température de la surface du solide (°C).

S : Surface d'échange thermique

T : Température (°C ou K)

K : La perméabilité (m^2)

C_0 : Le coefficient de forme

D : Le diamètre de la sphère

S_s : La surface spécifique

L_{cap} : la longueur moyenne d'un tuyau capillaire ondulé

L : la longueur du milieu

V : La vitesse d'écoulement (m/s)

Q : le débit (m^3/s)

S : la surface (m^2)

V_s : Volume de solide (nanoparticules).

V_T : Volume totale (nanoparticules + fluide de base).

C_p : La chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

k : La conductivité thermique

k_{eff} : La conductivité thermique effective

g : Accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$)

Gr : Nombre de Grashof

Nu : Nombre de Nusselt

Pr : Nombre de Prandtl

Ra : Nombre de Rayleigh

Da : Nombre de Darcy

T_0 : La température de référence. ($^{\circ}C$ ou K)

ρ_0 : La densité du fluide à une température de référence.

u, v : Les composants du champ de vitesse dans les directions x, y ($m \cdot s^{-1}$)

x, y : Les coordonnées cartésiennes

Symbole Grecque :

β : Coefficient d'expansion thermique (K^{-1})

ϕ : Le flux de chaleur

σ : Constante de Stéphan Boltzmann ($W \cdot K^{-4} \cdot m^{-2}$)

Φ : La porosité

τ : Tortuosité

μ : La viscosité dynamique ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)

ρ : La masse volumique du fluide (kg/m^3)

μ_{eff} : la viscosité équivalente de même ordre de grandeur que celle du fluide.

φ : La fraction volumique

α : Coefficient de diffusion thermique (m^2/s)

β : Coefficient d'expansion thermique (K^{-1})

ν : la viscosité cinématique (m^2/s)

Indice :

f : Fluide de base

nf : Nano fluides

hnf : Nano fluide hybride

s : Nanoparticules

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine industriel et technologique, on trouve souvent le phénomène de transfert de chaleur et ses différentes applications dans plusieurs domaines. Sous ses diverses formes rayonnement, conduction et convection, cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiques tels que le refroidissement des processeurs, des composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleurs, etc. [1]

Le transfert thermique est de grande importance, il se trouve un peu partout par exemple dans les chambres chauffées, les halls d'usines, les maisons vertes, les récipients refroidis de stockage de nourriture, et dans les véhicules où la chaleur générée par le moteur d'entraînement. De même, les équipements électroniques dissipent la chaleur, ce qui nécessite un système de refroidissement. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ont aussi besoin de différents processus de transfert de chaleur. [1]

L'écoulement des fluides et le transfert de chaleur dans les milieux poreux ont reçu beaucoup d'attention au cours des dernières décennies en raison de nombreuses applications pratiques telles que, le stockage de substances radioactives, déchets nucléaires, refroidissement par transpiration, procédés de séparation chimiques dans l'industrie, filtration, isolation des fibres [2].

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux s'effectue essentiellement selon deux modes :

- 1) la conduction** a travers l'ensemble du milieu poreux sous l'effet des gradients de température
 - 2) la convection** des fluides qui permette le transfert de l'énergie thermique qu'ils contiennent.
- La transmission de chaleur par la convection est désignée, selon le régime d'écoulement du fluide, par convection libre, convection forcée ou par convection mixte. [3]

Le besoin d'améliorer les transferts thermiques des fluides a donné naissance au développement de la nanotechnologie et spécialement technique des nano fluides.

Ces derniers sont des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide à base classique telle l'eau.

Grâce à leurs propriétés améliorées de transfert thermique, les nano fluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications en ingénierie : l'industrie automotrice, le génie biomédical, le refroidissement des éléments électroniques...etc. [2]. et même en milieu poreux rendant la complexité extrême comme deuxième niveau. [1]

On s'intéressera dans ce mémoire à l'analyse physique par une simulation numérique d'un modèle d'écoulement bidimensionnel 2D en régime de la convection laminaire dans une cavité triangulaire contenant le milieu poreux. L'objectif est de comprendre l'effet des dimensions du milieu poreux sur l'échange thermique en utilisant de nano fluide hybride (AL_2O_3+Cu -eau) et avec différentes concentrations.

Le présent travail est structuré de la façon suivante :

Dans **le premier chapitre** nous exposons les travaux expérimentaux, théoriques et numériques antérieurs réalisés sur le transfert de chaleur en présence des milieux poreux et les nano fluides et les nano fluides hybrides.

Le deuxième chapitre consacré sur l'étude théorique ; en premier lieu nous avons commencé par le transfert de chaleur et ses modes (conduction, convection et rayonnement).

En deuxième lieu, on a présenté les milieux poreux, ses domaines d'applications ainsi que ses caractéristiques. Puis les modèles d'écoulement en milieu poreux.

En troisième lieu, l'étude des nano-fluides et nano-fluides hybrides, leurs définitions, leurs domaines d'applications et leurs propriétés thermo-physiques, Puis on finit par une conclusion.

Le troisième chapitre : consacrée à la modélisation et la mise en équations du problème (Équation de continuité, Équation de quantité de mouvement, Équation d'énergie) avec les conditions aux limites et faire apparaitre les nombres adimensionnels de référence et ainsi que les propriétés thermo-physiques des nano-fluides hybrides utilisés dans cette simulation.

Le quatrième chapitre : présente ansys-workbench et la simulation numérique en utilisant CFD.

Le dernier chapitre : on a présenté les principaux résultats de cette simulation et leur interprétation et les discutées.

Chapitre I :
Analyse bibliographique

I.1. Introduction :

Durant les dernières années, les études traitant le transfert de chaleur en présence de milieu poreux et les nano fluides ont augmenté d'une manière significative. Cet intérêt est dû à la présence des deux dans beaucoup d'applications techniques, tels que, les échangeurs de chaleur, l'isolation thermique, les réacteurs chimiques,...etc. Certains auteurs se sont penchés sur les écoulements internes : écoulements dans des conduites et entre deux plaques parallèles, d'autres se sont intéressés aux écoulements à surface libre tel que l'écoulement sur une plaque plane. Les études effectuées sont analysées soit par des méthodes numériques, ou par des approches analytiques ou encore par des procédés expérimentaux. [4]

I.2. Synthèse bibliographique :

- *L'effet du milieu poreux:*

Benmerkhi Meriem [5]: a présenté une simulation numérique du transfert de chaleur et de matière dans un canal partiellement rempli d'une matière poreuse saturée de l'air et d'une certaine concentration de la vapeur d'eau. Le canal horizontal est divisé en trois parties égales, la première et la troisième contiennent un écoulement d'air, alors que la deuxième contient de l'air en écoulement à travers la matière poreuse. Les parois du premier et troisième tiers sont considérées adiabatiques et imperméables, mais celles du deuxième sont maintenues à une température constante inférieure à celle de l'écoulement à l'entrée, et une concentration constante supérieure à celle de l'écoulement à l'entrée. La méthode numérique des volumes finis avec une discrétisation spatiotemporelle du second ordre, est utilisée pour la résolution des équations de conservation de la masse, des quantités de mouvement, de l'énergie et de la matière. La présence du milieu poreux augmente considérablement le transfert thermique, et légèrement le transfert de matière. Pour des nombres de Grashof égaux à 10^4 , les résultats de la convection mixte sont similaires à ceux de la convection forcée. Cependant, l'augmentation des nombres de Grashof à 10^5 , conduit à des petites différences entre les résultats de la convection forcée et mixte.

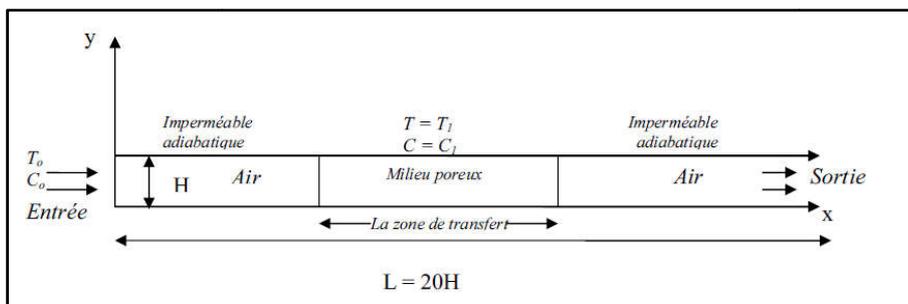


Figure I.1 : Le schéma du problème considéré, Benmerkhi Meriem

BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir (2019) [6]: ont présenté une étude sur la convection naturelle lors du refroidissement d'un composant électronique (source de chaleur) enveloppé par une couche poreuse à l'intérieur d'une cavité carrée dont les parois verticales sont maintenues à la même température froide, alors que les parois horizontales sont adiabatiques. L'écoulement fluide est gouverné par les équations de Navier–Stokes dans la zone fluide, le modèle de Darcy–Brinkman–Forchheimer dans la couche poreuse et le champ thermique par l'équation d'énergie. La résolution est obtenue en utilisant la méthode des volumes finis et l'algorithme SIMPLER. Les résultats ont été présentés en termes des contours de la fonction du courant, d'isothermes et les profils du nombre de Nusselt et de la température. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'une couche poreuse avec une conductivité thermique élevée favorise le refroidissement du composant électronique.

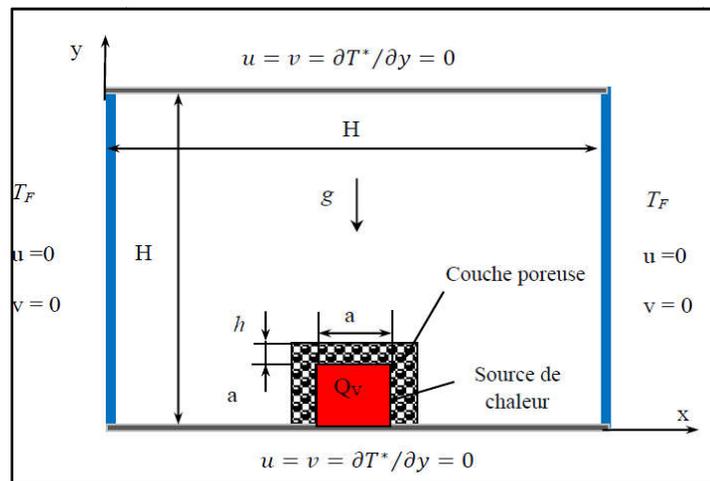


Figure I.2 : géométrie de problème considéré, BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir (2019)

SASSANE Nadjette (2008) [7]: ce travail est un rappel des bases théoriques de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. Et une modélisation du transfert de chaleur dans un milieu poreux saturé par un fluide. Elle a développé un code numérique pour modéliser le transfert de chaleur et l'écoulement laminaire de la convection forcée permanente et bidimensionnelle, pour deux types de configurations géométriques. Le premier est une cavité rectangulaire (Lid driven cavity), remplie d'un fluide et chauffée différemment par deux cotés opposés, tandis que les deux autres sont adiabatiques. La seconde est un conduit rectangulaire, chauffé par un flux de la chaleur de densité constante, tandis qu'à l'entrée du conduit on impose une température T_0 et un champ de vitesse u_0 uniformes.

CHARLES VILLEMURE (2007) [8] : Cette étude traite de l'optimisation d'un échangeur de chaleur constitué d'une juxtaposition de différentes couches de matériaux poreux. Grâce à un réseau interne de pores, un fluide refroidissant est libre de circuler à travers l'échangeur par convection naturelle. Les équations de conservation de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par une méthode basée sur les volumes finis. Les résultats indiquent qu'il est possible d'améliorer les performances thermiques du refroidisseur en sélectionnant une distribution de porosités adéquate ainsi qu'un ordonnancement idéal des matériaux de la série de couches.

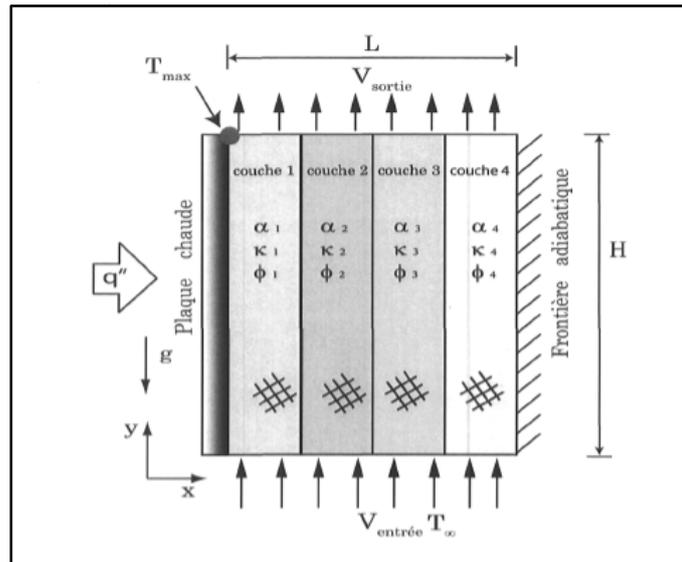


Figure I.3: Schéma de l'échangeur, CHARLES VILLEMURE (2007)

BOULECHFAR Hichem (2016) [9] : Les transferts de chaleur et de masse par convection naturelle en régime laminaire et permanent dans un espace annulaire elliptique horizontal bidimensionnel rempli par un milieu poreux saturé de fluide, a été analysé numériquement en mettant au point un code de calcul aux volumes finis et en utilisant la formulation vorticité-fonction de courant pour résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et de la concentration, en utilisant la loi de Darcy et l'approximation de Boussinesq. Les deux parois délimitant l'espace annulaire sont maintenues à des températures et des concentrations uniformes. Les paramètres de contrôle liés à l'écoulement sont le nombre de Rayleigh-Darcy, nombre de Lewis et le rapport de flottabilités. L'angle d'inclinaison et les excentricités des cylindres elliptiques sont les paramètres liés à la géométrie. Le transfert de chaleur et de masse par convection naturelle est étudié pour les deux cas, coopérant et opposant des gradients de température et de concentration. Les nombres de Nusselt et de Sherwood locaux et moyens sont présentés en fonction des paramètres de contrôle.

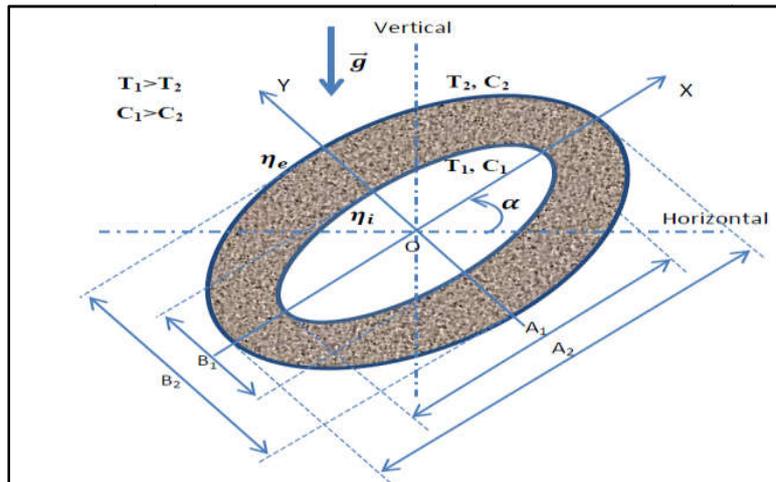


Figure I.4 : Géométrie du système, BOULECHFAR Hichem (2016)

D'autre part, on trouve **G. Degan (2001) [10]** a présenté une solution exacte pour développer pleinement l'écoulement convectif forcé dans un poreux horizontal à plaques parallèles. Canaux à perméabilité anisotrope dont les axes principaux sont orientés dans une direction oblique à la gravité vectrice. Un flux de chaleur constant est appliqué sur les parois latérales du canal. En basant cette analyse sur le modèle généralisé de Brinkman modèle de Darcy qui permet la satisfaction de la condition aux limites de non-glissement sur paroi pleine, on trouve que les paramètres anisotropes K et u ont une forte influence sur le champs d'écoulement et le taux de transfert de chaleur, dans le cas limite de milieu à faible porosité ($Da \rightarrow 0$). Les résultats indiquent qu'un taux de transfert de chaleur maximum (minimum) est atteint lorsque le l'orientation de l'axe principal avec une perméabilité plus élevée de la matrice poreuse anisotrope est parallèle (perpendiculaire) à la direction verticale.

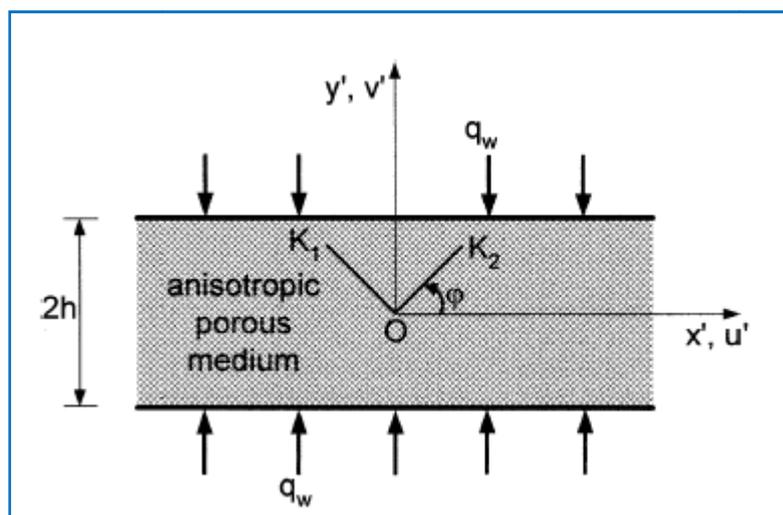


Figure I.5 : Situation physique et système de coordonnées, G. Degan. (2001)

- *L'effet des nano fluides*

Bachir Glades (2010) [11] : a étudié l'influence de la concentration en nanoparticules (Al_2O_3 , CuO, Cu, Ag and Au) dispersées dans un fluide de base sur le transfert de chaleur par conduction et convection en configuration de Rayleigh-Bénard. Les relations donnant la chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique des nano fluides, utilisées dans le présent travail, déduites à partir des lois de la thermodynamique différent de celles approchées retenues dans la littérature. On montre que pour une cellule expérimentale donnée et à différence de température fixée l'ajout de nanoparticules dans un fluide porteur conduit à une diminution du nombre de Rayleigh dans le nano fluide obtenu compare à celui dans le fluide porteur seul. L'apparition de la convection est donc retardée dans le nano fluide. Il s'ensuit que contrairement a ce qui a été obtenu antérieurement par de nombreux auteurs, on a montre que la présence de nanoparticules solides dans un fluide porteur peut réduire le transfert de chaleur au lieu de l'augmenter. Le transfert de chaleur est plus important dans un nano fluide que dans le fluide de base qu'en régime de conduction et pour les grandes valeurs du nombre de Rayleigh.

Salma Halefadi (2014) [12]: a mené une étude expérimentale sur les propriétés thermo-physiques des nano fluides testés (conductivité thermique, viscosité dynamique, masse volumique) et sur les performances thermiques dans un échangeur de chaleur. Il a présenté également une analyse des résultats de façon à étudier l'influence des paramètres évoqués ci-dessus. Les résultats obtenus sont comparés et discutés vis-à-vis des modèles classiques existants, en proposant des améliorations et des interprétations selon les tendances obtenues. Les résultats prometteurs de cette étude sont très encourageants et montrent que l'utilisation des nano fluides à base de nanotubes de carbone offre clairement une amélioration des performances thermiques par rapport aux fluides de base classiques. Les nano fluides à base de NTC peuvent constituer ainsi un débouché prometteur des transferts thermiques et présentent de bonnes perspectives et développement

Salhi Hicham (2015) [13]: a mené une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte inclinée (carrée et ondulée) chauffée par une température aléatoire (basée sur la fonction de random) et remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules (Ag et TiO_2). Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis en utilisant un schéma hybride. Les champs thermique et dynamique ont été obtenus ainsi que le nombre de Nusselt. Les résultats obtenus montrent que le transfert de chaleur est influencé par la température aléatoire, l'angle d'inclinaison et la fraction Volumique, Particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé. Les paramètres de la géométrie complexe ondulée (longueur d'onde et le rapport d'amplitude) peuvent améliorer le transfert de chaleur.

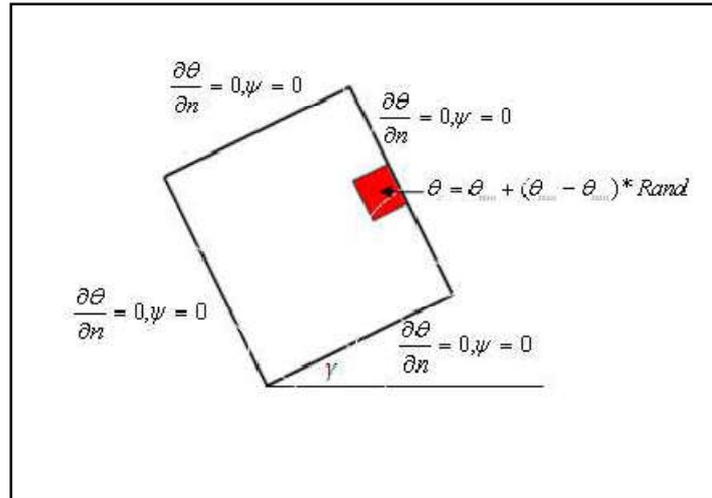


Figure I.6 : Schéma représentant les configurations étudiées et les conditions aux limites, Salhi Hicham (2015)

Une étude menée par **Ho et al. (2008) [14]** vise à identifier les effets dus aux incertitudes de la viscosité dynamique effective et la conductivité thermique du nano fluide sur le transfert de chaleur par convection naturelle laminaire dans une enceinte carrée remplie de nano fluide (alumine-eau) par la simulation numérique. Deux formules différentes de la littérature sont chacune considérées pour la viscosité effective et la conductivité thermique du nano fluide. Des simulations ont été réalisées pour les paramètres pertinents dans les gammes suivantes : le nombre de Rayleigh, $Raf = 10^3 - 10^6$ et la fraction volumique de nanoparticules d'alumine, $\varphi = 0-4 \%$. Les résultats démontrent que les incertitudes associées aux différentes formules adoptées pour la conductivité thermique efficace et viscosité dynamique du nano fluide ont une forte incidence sur les caractéristiques de transfert de chaleur par convection naturelle dans l'enceinte.

Islam ZID (2020) [15] : a étudié numériquement d'échangeur de chaleur à double tube concentrique, pour le régime de fonctionnement permanent, Les systèmes d'équations qui gouvernent le phénomène à étudier sont été résolus par la méthode des différences finies. Un programme de calcul numérique en langage (Matlab) est été réalisé pour déterminer les variations de températures pour les deux circulations (Co-courant et contre-courant), coefficient d'échange local, efficacité. Les calculs sont été effectués pour le cas de fluide pur (eau) et le cas des nano fluides pour différente nanoparticules (TiO_2 , AL_2O_3 et Cu) avec différente concentrations (0,1, 0,2 et 0,3). Les résultats ont démontré que l'efficacité de l'échangeur de chaleur dans le cas du nano fluide est meilleure que celle du fluide pur (eau).et il a trouvé que le fluide qui permet un meilleur transfert de chaleur est le nano fluide qui contient les nanoparticules de cuivre (Cu) suivie par AL_2O_3 et TiO_2 , et qu'une augmentation de la

concentration en cuivre (Cu) intensifie le coefficient d'échange. Dans le fluide de base (l'eau), par contre la génération d'entropie est moins importante.

FAID Hanane et CHERIEF Kalthoum (2020) [16]: ont étudié numériquement 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 10^3 à 10^5 , 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).

E. BELAHMADI, R. BESSAÏH [17] : ont présenté une étude numérique bidimensionnelle de la convection mixte laminaire dans un canal vertical rempli du nano fluide Cu-eau. Les parois du canal sont maintenues à une température uniforme et relativement élevée, T_W . Un courant ascendant de nano fluide Cu-eau pénètre dans le canal à une température constante relativement faible, T_O , et une vitesse uniforme, V_O . Le logiciel Ansys-Fluent 14.5 a été utilisé pour résoudre le modèle mathématique : l'équation de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Les résultats obtenus sont validés avec des données trouvées dans la littérature. Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, des isothermes, du nombre de Nusselt local et moyen pour différentes valeurs des nombres du Reynolds, Re et du Grashof, Gr , et de la fraction volumique solide des nanoparticules ϕ .

Les résultats montrent que les paramètres précédents ont des effets considérables sur les champs d'écoulement et thermiques. Il a été constaté que l'augmentation de Re , Gr et ϕ améliore le transfert de chaleur.

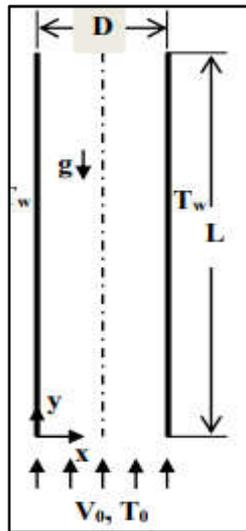


Figure I.7: Le schéma du modèle physique et les conditions aux limites, E. BELAHMADI, R. BESSAÏH

EL KHAOUDI FATIMA et al. (2015) [18] : ont étudié numériquement la convection naturelle laminaire et non permanent dans une enceinte rectangulaire chauffée par le côté et remplie d'un mélange d'eau et de nanoparticules. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis en utilisant un schéma hybride. Un code numérique a été conçu et réalisé dans ce contexte pour utiliser la simulation numérique comme outil d'investigation. Une étude paramétrique a été menée en considérant le nombre de Rayleigh, le type de nano fluide. Les résultats obtenus montrent clairement que l'utilisation des nano fluides peut influencer considérablement le transfert de chaleur dans ce type de géométrie

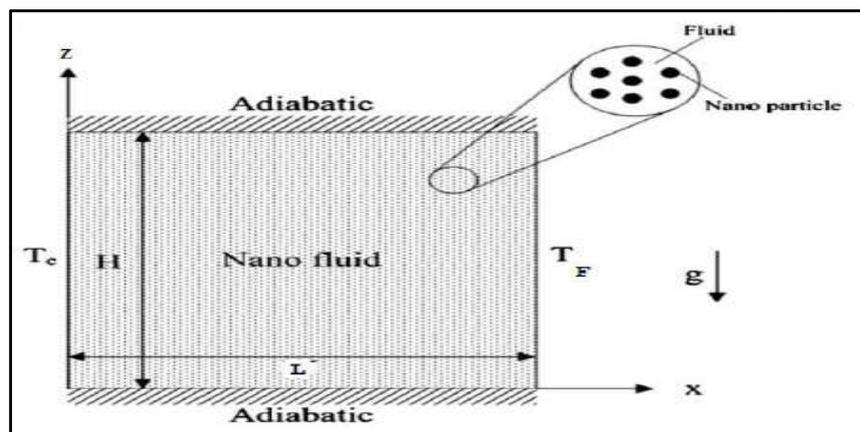


Figure I.8 : Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites, EL KHAOUDI FATIMA et al. (2015)

Mahdi Benzema et al.(2021) [19] : ont analysé numériquement les phénomènes convectifs lors de l'écoulement d'un nano fluide hybride au sein d'une cavité trapézoïdale ventilée et soumise à l'action d'un champ magnétique externe. Des corrélations empiriques spécifiquement développées pour le nano fluide hybride étudié (Ag-MgO / Eau) ont été utilisées pour le calcul de la viscosité dynamique du nano fluide ainsi que sa conductivité thermique. L'étude portait sur les effets des nombre de Reynolds de Hartmann ainsi que celui de la fraction volumique totale en nanoparticules sur les caractéristiques hydrodynamique et thermique au sein de cavité. Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les points suivants :

- L'application d'un champ magnétique uniforme a montré sur le plan hydrodynamique, un ralentissement de l'écoulement ascendant du nano fluide 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.
- 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 $Re = 400$ qui tend à aliéner l'effet de la présence des nanoparticules. Finalement, il y apparait 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.

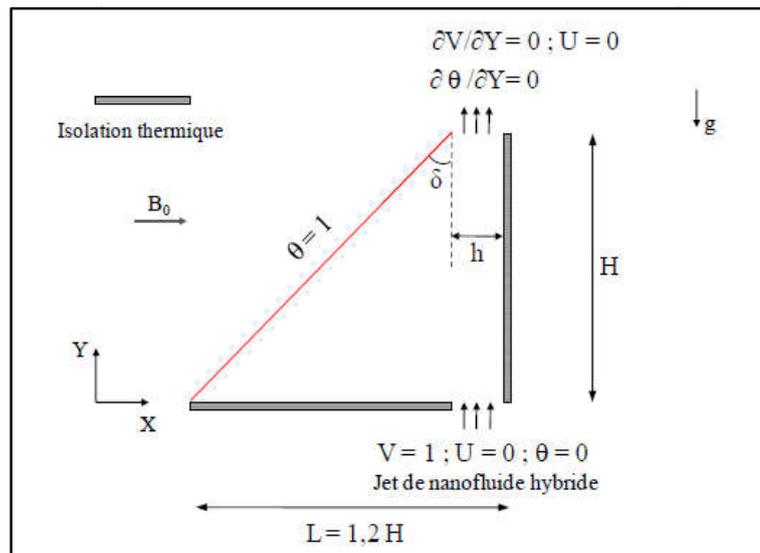


Figure I.9 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles, Mahdi Benzema et al. (2021)

E. EBRAHIMNIA-BAJESTAN et al. (2015) [20] : ont présenté une étude expérimentale de transfert de chaleur par convection laminaire pour deux types de nano fluides circulant dans un tube chauffé uniformément. Les nano fluides préparés sont constitués de nanoparticules d'argent et d'oxyde de titane dispersées dans de l'eau. La conductivité thermique et la viscosité dynamique de ces nano fluides ont été mesurées et modélisées pour différentes températures et concentrations. De plus, le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge des nano fluides circulant dans le tube ont été mesurés pour différents nombres de Reynolds.

Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge augmentent avec la concentration des nanoparticules et le nombre de Reynolds. Finalement, un critère a été introduit pour identifier les nano fluides appropriés pour leur utilisation dans les échangeurs de chaleur et les systèmes énergétiques.

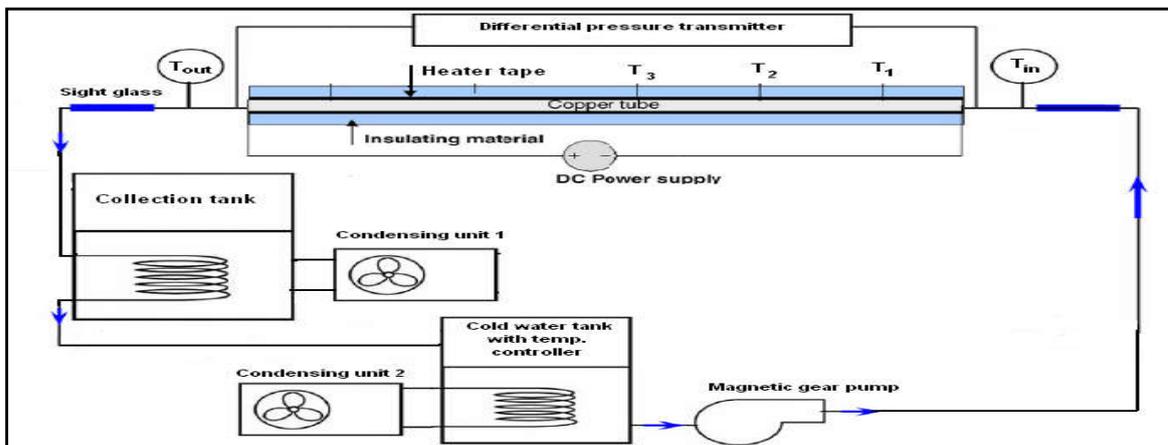


Figure I.10: Schéma de l'appareil expérimental de transferts thermiques convectifs, E.EBRAHIMNIA-BAJESTAN et al. (2015).

- *L'effet des nano fluides et les milieux poreux:*

SALHI MASSINISSA et MAMMERI LAMIA (2019) [2] : Ce travail a pour objectif étude d'un écoulement convectif d'un nano fluide à travers un milieu poreux non Darcéen au-dessus d'une surface imperméable horizontale chauffée. Ceci passe par l'obtention des équations de la couche limite dynamique et thermique pour un écoulement en convection mixte en utilisant les transformations par similarité pour les équations de quantité de mouvement et de l'énergie. Après l'obtention des équations différentielles ordinaires non linéaires en utilisant la méthode de Runge-Kutta associée à la méthode de tir pour la résolution numérique. Ils ont varié trois paramètres, paramètre de convection mixte (λ), paramètre de l'effet inertiel (G) et la fraction

volumique de nano fluide (ϕ) pour tracer des profile de température, de vitesse et le nombre de Nusselt.

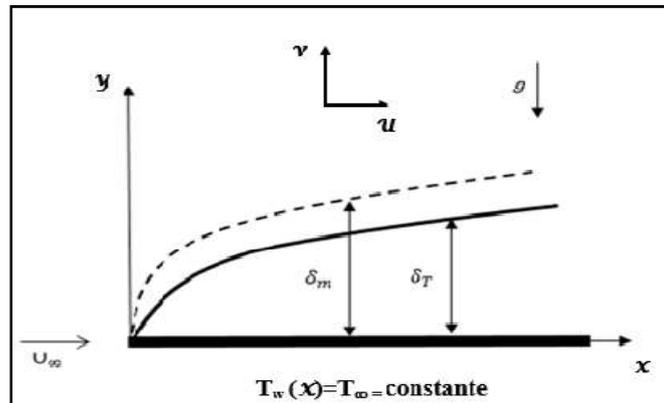


Figure I.11 : Géométrie du problème, SALHI MASSINISSA et MAMMERI LAMIA (2019)

Hamadi hamza et Nassou Mourad (2020) [21]: Ce travail a pour objectif étude d'un écoulement convectif le long d'une surface inclinée immergée dans un milieu poreux rempli d'un nano fluide.

L'obtention des équations de la couche limite dynamique et thermique pour un écoulement en convection mixte en utilisant les transformations par similarité pour les équations de quantité de mouvement, de l'énergie et de fraction volumique. Les équations différentielles qui régissent le problème sont transformées en un ensemble de trois équations ordinaires (similaires), qui sont résolues par voie numérique, à l'aide de la méthode de Runge Kutta et la méthode de tir en utilisant le code Matlab. Un ensemble de résultats présenté sous forme graphique pour les profils de vitesse, de température et fraction volumique avec variation des paramètres. En outre, Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence de différents paramètres de contrôle sur l'écoulement convectif notamment sur les profils de vitesse, température et la fraction volumique.

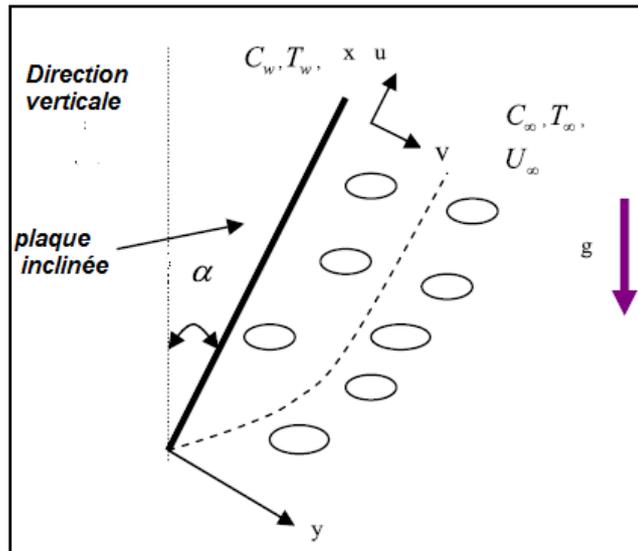


Figure I.12 : Représentation schématique du modèle physique, Hamadi hamza et Nassou Mourad (2020).

Le problème de convection forcée d'un nano fluide dans un canal à plaques parallèles rempli d'un milieu poreux anisotrope en perméabilité et conductivité thermique est étudié numériquement en tenant compte des effets du mouvement Brownien et thermophorèse [22]. Dans cette étude l'écoulement dans le milieu poreux est décrit par le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer, et les équations gouvernantes avec les conditions aux limites associées sont résolues par la méthode des volumes finis. Les résultats font ressortir des cas de figure pour lesquelles l'anisotropie d'un milieu poreux conduit à des améliorations significatives du transfert de chaleur par rapport au cas isotrope.

Cette étude a permis de faire ressortir les points suivants :

- Augmenter les rapports d'anisotropie qui revient à réduire la perméabilité suivant la direction axiale X pour K^* et accroître la conductivité thermique effective du milieu poreux suivant la direction transversale Y pour λ , conduit à une réduction des épaisseurs des couches limites dynamique et thermique et donc améliore le transfert de chaleur.

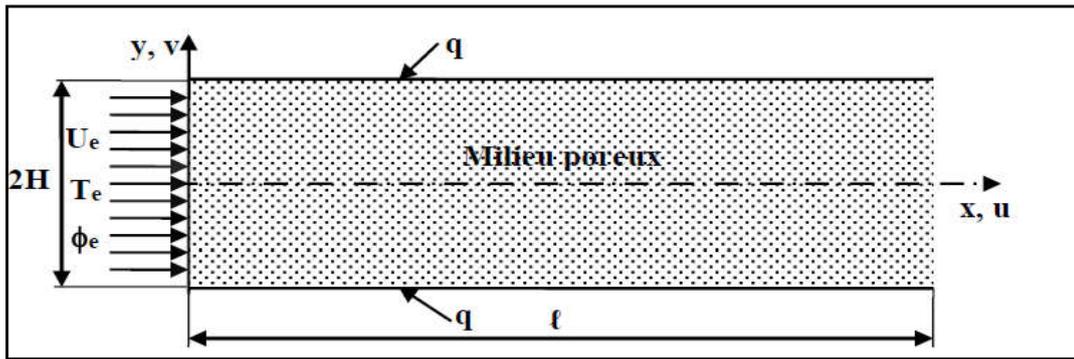


Figure I.13 : Domaine physique étudié, I. FERSADOU, H. KAHALERRAS. (2016)

Cimpean et al. (2020) [23] : ont étudié le problème de la convection mixte dans une cavité trapézoïdale poreuse remplie d'un nano fluide hybride (Cu- AL_2O_3 /eau) ; et les résultats numériques ont été obtenus et discutés. Les équations gouvernantes, transformées en termes de variables sans dimension, ont été élaborées par l'algorithme numérique développé basé sur la technique des différences finies. Les résultats numériques des lignes de courant et des isothermes sont été étudiés et l'effet de différents paramètres importants, tels que: le nombre de Reynolds, le nombre de Darcy et la fraction volumique des nanoparticules ont été discutés. La variation du nombre de Nusselt moyen et du débit de fluide a été obtenue et ils ont constaté qu'en choisissant des combinaisons de nanoparticules différentes et appropriées dans un nano fluide hybride, le taux de transfert thermique souhaité peut être obtenu.

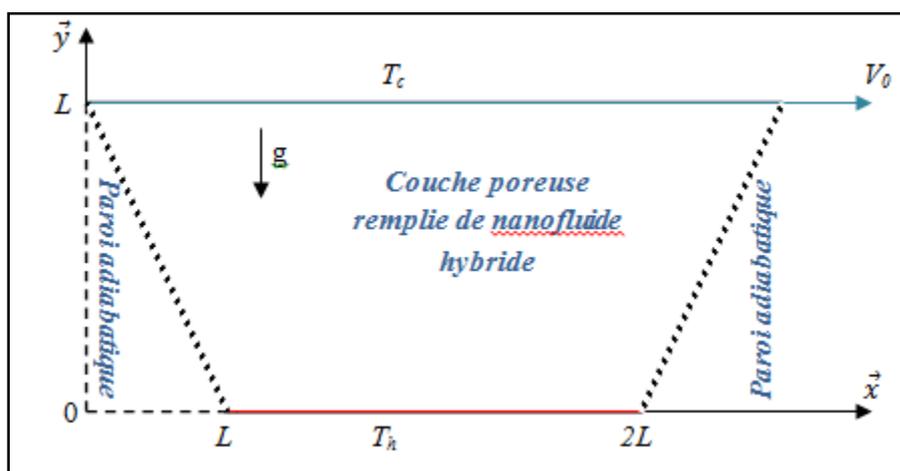


Figure I.14 : Configuration de l'étude, Cimpean et al. (2020)

Raza et al (2016) [24] : ont également traité de l'analyse du transfert de chaleur sur des nano fluides MHD dans un canal poreux à parois extensibles. Un nano fluide cuivre Cu-eau incompressible est rempli dans le canal poreux. Ils ont constaté que les différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules, du nombre de Reynolds, du champ magnétique et du nombre de Prandtl affectent les profils de vitesse, de température, de frottement cutané et de transfert de chaleur.

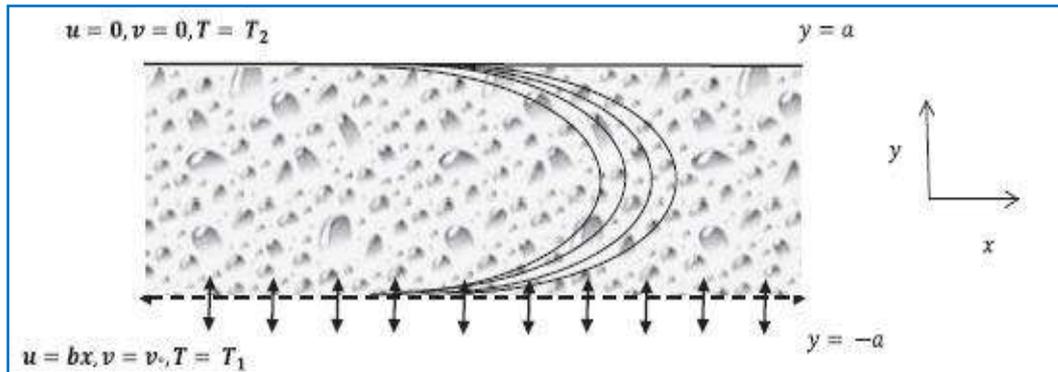


Figure I.15 : Modèle physique du problème proposé, Raza et al. (2016).

I.3. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une recherche bibliographique sur le transfert de chaleur en présence des milieux poreux et les nano fluides, Dans le chapitre suivant on présentera les milieux poreux et les nano fluides.

Chapitre II :

Modélisation thermo-physique de nano fluide et généralité sur les milieux poreux

II.1. Introduction:

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels [25]. Les ingénieurs et les techniciens se trouvent confrontés à ce genre de problème ; et essayent de maximiser ou de minimiser ce phénomène selon les besoins de l'industrie et dans le souci d'économiser cette énergie qui revient chère [26]. Pour les deux dernières décennies, il y a eu un intérêt croissant sur les phénomènes de transfert de chaleur en milieu poreux en raison de leur importance dans de nombreux domaines naturels [5]. Les techniques passives d'amélioration du transfert de chaleur au niveau des surfaces d'échange sont une voie largement explorée et atteignent les limites des efforts visant à améliorer le transfert de chaleur dans des divers secteurs industriels, de nouvelles voies d'optimisation doivent être étudiées, l'une d'elles consiste à utiliser des nouveaux fluides capables d'accroître les transferts thermiques c'est le cas des nano fluides et les nano fluides hybrides [27].

II.2. Généralité sur le transfert de chaleur:

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. On reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement [25].

II.2.1. modes du transfert de chaleur [28]:

II.2.1.1. transfert de chaleur par conduction : C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu solide opaque, sans déplacement de la matière, sous l'influence d'une différence de température. Dans les fluides, elle est presque toujours combinée à la convection et au rayonnement.

- **La loi de Fourier :**

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de la température :

$$\vec{\phi} = -\lambda.S.\overrightarrow{grad}(T) \quad (II.1)$$

Ou sous sa forme algébrique :

$$\phi = -\lambda.S.\frac{dT}{dx} \quad (II.2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction [w]

λ : Conductivité thermique du milieu [$w.^\circ C^{-1}.m^{-1}$] ou [$w. K^{-1}. m^{-1}$]

S : Aire de la section de passage du flux [m^2]

x : Variable d'espace dans la direction du flux [m]

Le signe moins (-) provient d'une convention qui rend positif un flux de chaleur s'écoulant du chaud vers le froid dans le sens d'un gradient négatif.

II.2.1.2. transfert de chaleur par convection : C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide. L'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

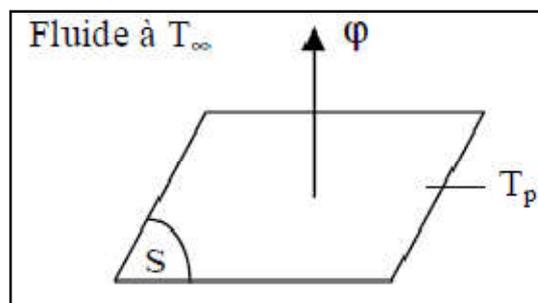


Figure II 1 : Schéma du transfert de chaleur convectif

$$\Phi = h.S(T_{p1} - T_{\infty}) \quad (II.3)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (w).

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

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

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

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

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

On distingue : La convection forcée, la convection naturelle (libre) et la convection mixte.

- **la convection forcée** : Le mouvement du fluide est dû à l'action d'une pompe, d'un ventilateur ou d'une cheminée placée dans le circuit.
- **la convection naturelle (libre)** : le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles-mêmes dues à des différences de températures existantes dans le fluide.
- **La convection mixte** : Correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictive, due aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur [16].

II.2.1.3. Transfert de chaleur par rayonnement : C'est le mode de transfert par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre froid. Les deux corps ne se touchent pas mais ils sont séparés par un milieu transparent tel que l'air.

- **Loi fondamentale du rayonnement thermique** :

La loi de Stefan-Boltzmann (1879) exprime que le flux d'énergie radiante émis par une surface idéale appelée « noir » est donnée par :

$$\Phi_N = \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann qui vaut $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [w.m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}]$.

S : Aire de cette surface [m^2].

T : Température absolue de cette surface [$^{\circ}\text{C}$ ou K]

L'émissivité du corps gris à la température T est :

$$\Phi_{NN} = \varepsilon \cdot \Phi_N = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (\text{II.5})$$

II.3. Généralité sur les milieux Poreux :

Les écoulements de fluide à travers un milieu poreux se rencontrent dans des domaines très variés. A titre d'exemple on peut citer les problèmes de purification de l'eau, de dépollution des sols, d'extraction de pétrole, et de gaz,... [7]

II.3.1. Définition : le milieu poreux est un matériau composé d'une matrice solide avec des espaces vides (pores) [29] qui peuvent être interconnectées ou séparer [30] ; Ces pores reliées permettant d'écoulement d'un ou plusieurs fluides [31] ; dans la situation la plus simple (écoulement monophasique) le vide est saturé par un seule fluide ; Et dans un écoulement diphasique un liquide et un gaz se partagent l'espace vide [29].

On peut distinguer ce qu'il est d'usage d'appeler poreux granulaires et poreux consolidés :
[32]

- * Le poreux granulaire (non consolidés) typique est l'empilement de billes de verre ou de grains de sable.
- * Le poreux consolidé comme dans la roche calcaire ou le béton.

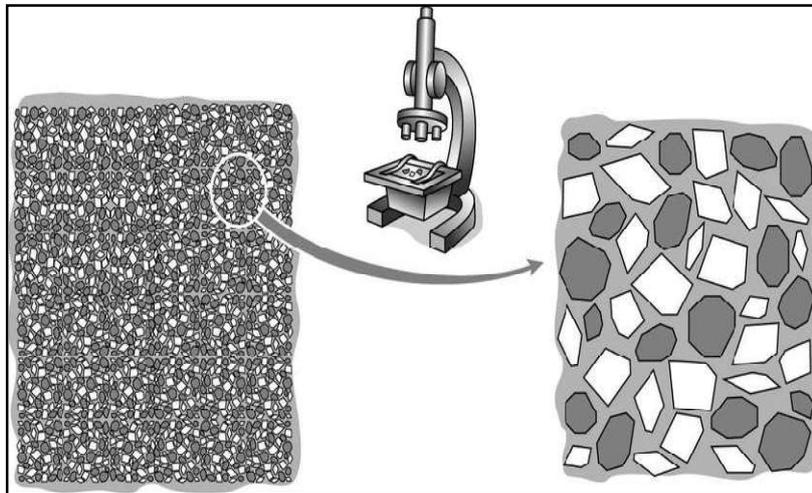


Figure II.2 : Exemple d'un milieu poreux [6]

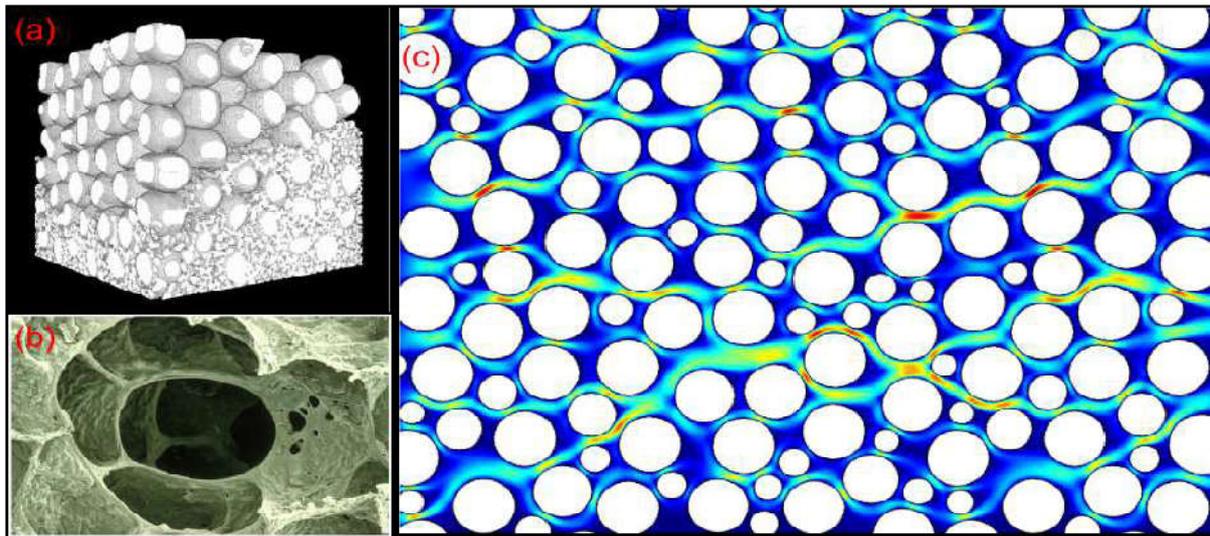


Figure II. 3 : (a) et (b): Exemples de structures poreuses 3D observées à l'échelle du pore. (a) Reconstruction 3D du milieu poreux étudié par Holzner *et al.* [2015], obtenu par imagerie par rayons X. (b) Image d'un conduit alvéolaire pulmonaire entouré d'alvéoles, observée au microscope électronique à balayage, tiré de Gehr *et al.* [1978]. (c) Module du champ de vitesse 2D à l'échelle du pore, solution de l'équation de Navier-Stokes, résolue numériquement à l'aide du logiciel de modélisation Comsol (vitesses faibles en bleu, vitesses fortes en rouge) [33].

Il existe plusieurs exemples de milieux poreux naturels (**Figure II .4**), comme le sable (a), les sols (b - pierre), les matériaux de construction (c - chaux), les aliments (d - pain sec), le papier ou le bois (e), les tissus (f - poumon humain) [34]:

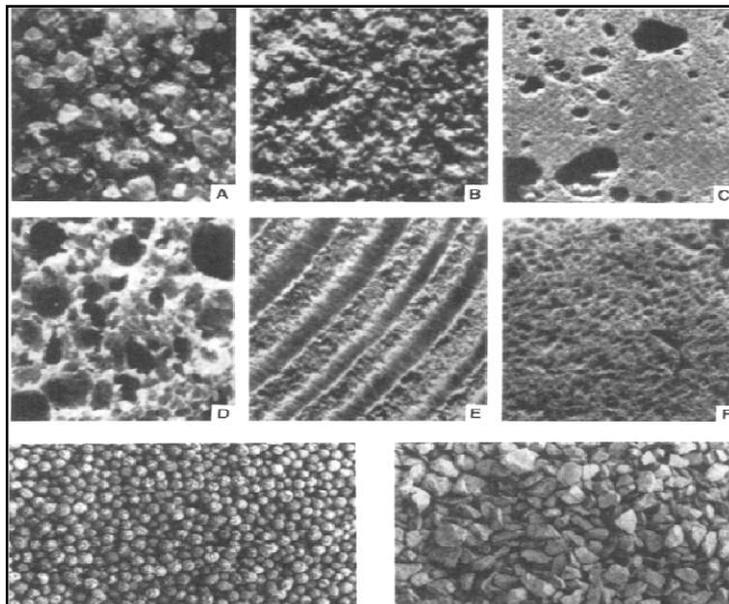


Figure II .4 : Exemples de milieux poreux naturels (d'après " Convection in porous media) [34]

II.3.1.1. Les domaines d'application :

* les milieux poreux sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que : [34]

-Le génie pétrolier

-Le génie chimique

-L'hydrogéologie

-La géothermie

-Le génie thermique

-Le génie médical

-Le génie civil

II.3.2. Les paramètres que caractérisant milieu poreux :

II.3.2.1. La porosité (Φ) : est définie comme la fraction du volume total du milieu qui est occupé par l'espace vide : [29]

$$\Phi = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume total}} \quad (\text{II.6})$$

D'une manière générale on distingue deux types de porosité [35]:

-**La porosité d'interstice** (figure II .5.a) : représente les vides autour de particules solides plus ou moins liées les unes aux autres.

-**La porosité de fissure** (figure II .5.b) : correspond à des fractures, fissures dans le matériau.

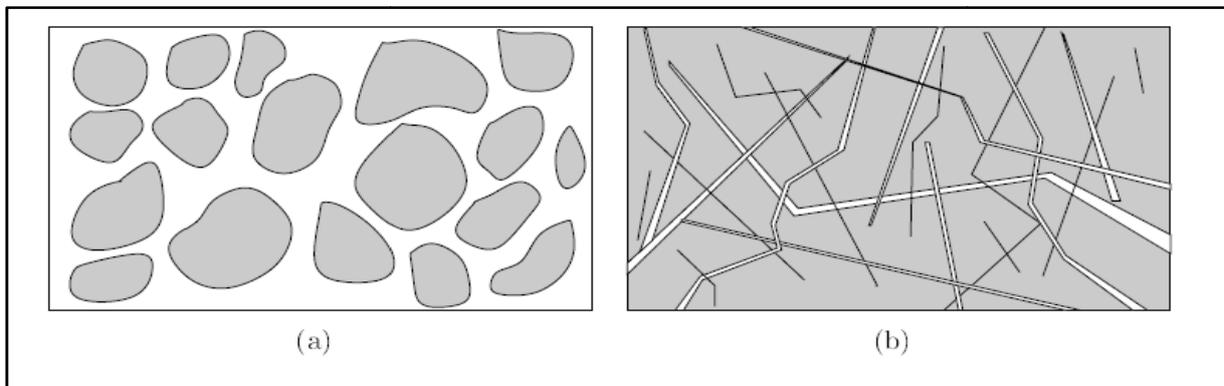


Figure II. 5: Les deux types de la porosité. [35]

II.3.2.2. La perméabilité (k) : est une caractéristique d'un milieu poreux qui permet de passer le ou les fluides à l'intérieur des pores [31] ; Elle est dépend de la porosité et de la géométrie et la porosité communicante [34].

La relation de Kozeny-Carman (1937) donne une estimation satisfaisante de K [31] :

$$K = \frac{D^2 \Phi^3}{36 C_0 (1-\Phi)^2} \quad (\text{II.7})$$

Où C_0 : Le coefficient de forme ; il est $3.6 < C_0 < 5$.

D : Le diamètre de la sphère.

Φ : La porosité.

Matériau	Porosité	Perméabilité
Ardoise	0.56 à 0.66	4.9×10^{-14} à 4.4×10^{-13}
Brique	0.12 à 0.34	4.8×10^{-15} à 2.2×10^{-13}
Charbon	0.02 à 0.12	-
Fibre de verre	0.88 à 0.93	-
Calcaire (dolomite)	0.04 à 0.10	2×10^{-15} à 4.5×10^{-14}
Sable	0.37 à 0.50	2×10^{-11} à 1.8×10^{-10}
Grès	0.08 à 0.38	5×10^{-16} à 3×10^{-12}
Silice (en poudre)	0.37 à 0.49	1.3×10^{-14} à 5.1×10^{-14}

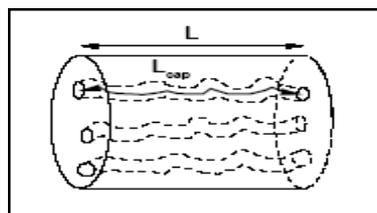
Tableau II .1 : Propriétés de quelques matériaux poreux [34]

II.3.2.3. La surface spécifique (S_s) : est définie comme l'aire interne de tous les pores par unité de volume (ou de masse). [30]

$$S_s = \frac{Asf}{V} \quad (\text{II.8})$$

II.3.2.4. Tortuosité (τ) : définit généralement à partir de l'analogie hydraulique ; Dans le cas où le milieu poreux étudié se modélise sous la forme d'un réseau de capillaire ondulé est définit comme le rapport de la longueur moyenne d'un tuyau capillaire ondulé L_{cap} sur la longueur du milieu L au carré. [31]

$$\tau = \left(\frac{L_{cap}}{L} \right)^2 \quad (\text{II.9})$$



II.3.2.5. Volume élémentaire représentatif : En fonction de la taille du volume considéré, les paramètres géométriques d'un milieu poreux varient grandement sur les premiers ordres de grandeur du matériau. À l'échelle de quelques pores, une disparité assez élevée de ces propriétés est encore possible du fait de l'agencement spécifique des micro-canaux autour du point d'observation. Néanmoins, il peut être supposé qu'il existe une taille minimale telle que, pour tout volume arbitraire au moins aussi grand, la valeur du paramètre géométrique considéré devienne à peu près constante. On appellera ce volume minimal Volume Élémentaire Représentatif (VER). [36]

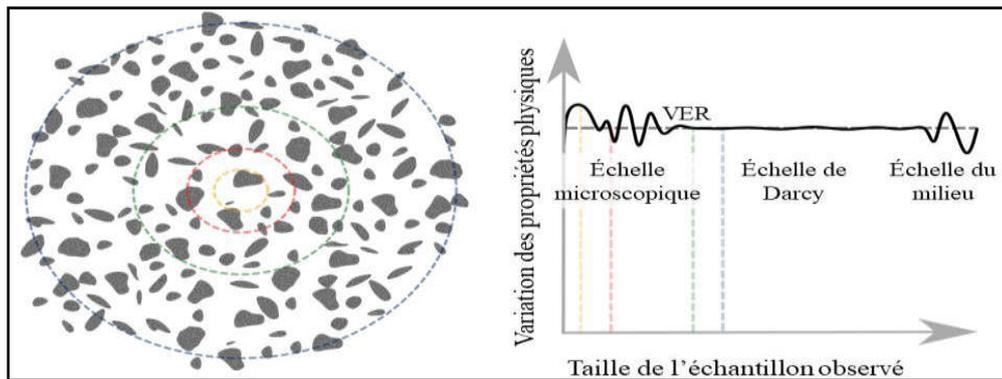


Figure II. 6 : Schématisation du Volume Élémentaire Représentatif. Sur les premières échelles de description, une disparité des propriétés physiques est présente en fonction des zones considérées du matériau (pointillés jaunes et rouges). Cependant, observées sur un volume suffisamment grand (pointillés verts), ces propriétés varient peu d'un point à l'autre. On observe la même invariance pour des volumes arbitraires plus grands (pointillés bleus). Cependant, pour des milieux hétérogènes, aux grandes échelles, des variations peuvent de nouveau apparaître sur les grandes échelles du fait d'une différence de microstructure. [36]

II .3.3. Modèles d'écoulement en milieu poreux :

II.3.3.1. La loi de Darcy : en 1856 le problème d'alimentation en eau de la ville de Dijon a conduit Henry Darcy d'annoncer sa loi dans son ouvrage « Les fontaines publique de la ville de Dijon [37] » ;

Les enquêtes d'Henry Darcy (1856) sur l'hydrologie de l'approvisionnement en eau de Dijon et ses expériences sur la circulation unidirectionnelle en régime permanent en milieu uniforme ont révélé une proportionnalité entre le débit et la différence de pression appliquée. Il a mis en évidence une relation linéaire entre la vitesse et le gradient de pression appliquée de part et d'autre du matériau poreux [38].

Cette loi s'applique à un milieu poreux homogène et isotrope parcouru par un écoulement à faible vitesse [38].

Cela s'exprime par : $V = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$

Où V : La vitesse d'écoulement (m/s) : $V = \frac{Q}{S}$ avec : Q : le débit (m^3/s) ; S : la surface (m^2)

K : La perméabilité (m^2)

μ : La viscosité dynamique ($N.s.m^{-2}$)

$\frac{\partial P}{\partial x}$: Le gradient de pression

On peut généraliser cette loi : $\nabla P = -\frac{\mu}{K} V$

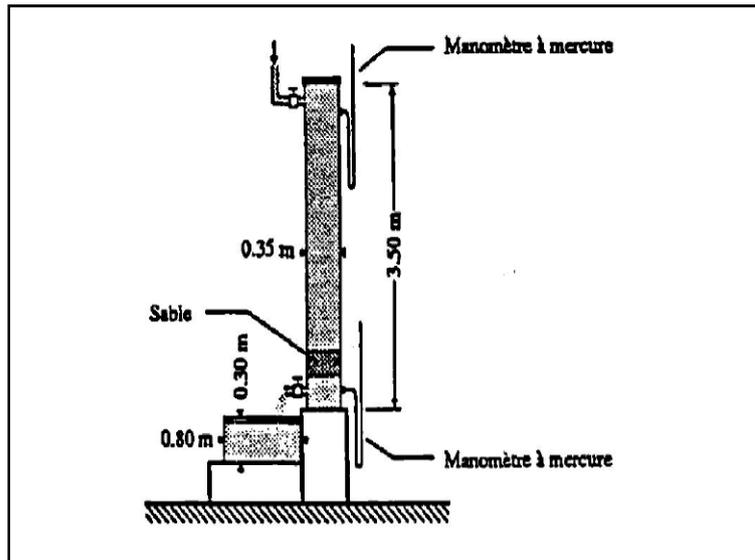


Figure II.7 : Dispositif expérimentale de Darcy [38].

II.3.3.2. La loi de Darcy-Forchheimer :

Lorsque la vitesse débitante augmente, les forces d'inertie ne sont plus négligeables [7] et la loi de Darcy devient insuffisante. Pour cela Forchheimer (1901) a proposé de modifier la loi de Darcy et quantifie les effets inertiels sous la forme d'une déviation à la loi de Darcy qui s'écrit [39]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} V + \rho \beta |V|^2 \quad (\text{II.10})$$

Où : ρ : la masse volumique du fluide.

β : le coefficient de Forchheimer évalué expérimentalement.

Le premier terme est le terme de Darcy.

II .3.3.3. La loi de Darcy-Brinkman :

Brinkman (1947) a considéré la loi de Darcy comme ce n'est pas la solution pour le problème car elle n'a pas définie les forces visqueuses. Donc il a proposé de combiner la loi de Darcy et les équations de Navier-stokes et obtenu la relation suivante [40] :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \mathbf{V} + \mu_{eff} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (II.11)$$

Où : μ_{eff} : la viscosité équivalente de même ordre de grandeur que celle du fluide. [39]

Le premier terme est le terme de Darcy.

Cette équation a l'avantage d'approximer pour les bases et hautes valeurs de perméabilité K d'un milieu poreux. [40]

II.3.3.4. la loi de Darcy-Brinkman –Forchheimer :

Les modifications initialement proposées par Forchheimer et Brinkman conduisent à l'équation suivante : [3]

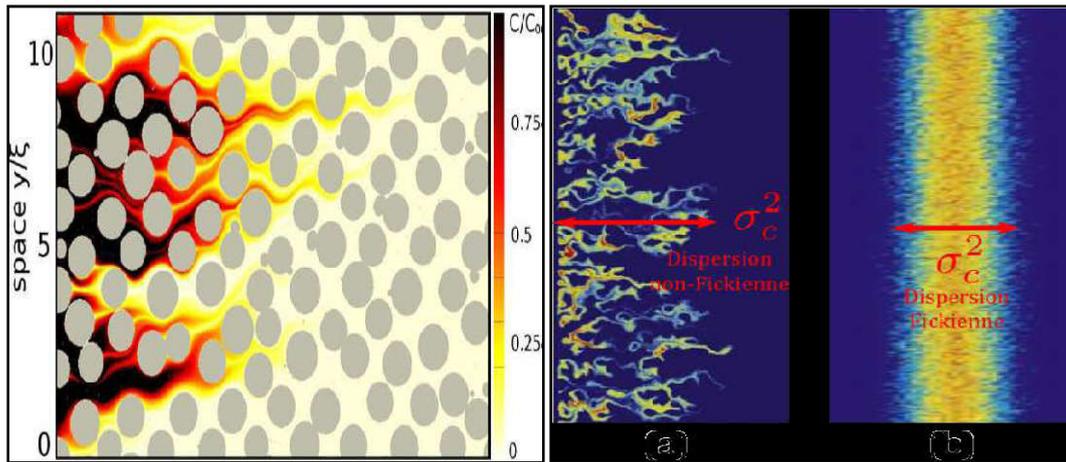
$$\rho \left[\underset{1}{\frac{1}{\Phi} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} + \underset{2}{\frac{1}{\Phi} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{\Phi} \right)} \right] = - \underset{2}{\frac{1}{\Phi} \vec{\nabla}(\Phi \rho)} + \underset{3}{\rho \vec{g}} + \underset{4}{\frac{\mu_{eff}}{\Phi} \nabla^2 \vec{V}} - \underset{5}{\frac{\mu}{K} \vec{V}} - \underset{6}{F \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V}} \quad (II.12)$$

\vec{V} : est une quantité moyennée à travers un volume élémentaire.

- 1 : Force inertielle macroscopique.
- 2 : Le gradient de pression.
- 3 : Force de volume.
- 4 : Terme visqueux de Brinkman.
- 5 : Terme de Darcy.
- 6 : Terme de Forchheimer (Forces inertielles microscopiques).

II.3.4. Transport en milieu poreux [33]:

L'opération de mélange est intimement liée aux processus de transport qui se chargent de déplacer les molécules de soluté (substance dissoute dans le fluide). La description du transport diffère selon que l'on se positionne à l'échelle du pore, ou à l'échelle de Darcy.



À l'échelle du pore

À l'échelle de darcy

Figure II .8 : transport en milieu poreux [33]

II.4. Généralités sur les nano fluides :

Les écoulements de fluides avec transferts de chaleur est un sujet qui continue à susciter beaucoup d'intérêt. Cet intérêt se traduit par de nombreuses applications technologiques et industrielles. Dans ces applications, le besoin d'améliorer le transfert de chaleur par convection est le but principal de plusieurs recherches. Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les changes thermiques on trouve celle de l'ajout de nanoparticules dans un fluide (nano fluide) [41]. Depuis 1995, l'activité de recherche sur les nano fluides croît de manière exponentielle [27]. Récemment un nouveau type de nano fluide a suscité l'attention des chercheurs, il s'agit des «nano fluides hybrides», est utilisée pour améliorer encore le taux de transfert de chaleur, obtenus en dispersant, dans un fluide base, deux sortes de nanoparticules.[16]

II.4.1. Définition :

Les nano fluides sont des dispersions de particules nanométriques appelées les nanoparticules dont la taille est inférieure à 100 nm dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés [27].

En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage tels que l'eau, l'huile, ou l'éthylène-glycol ont des conductivités thermiques très faibles qui limite leur capacité de transfert de chaleur.l'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques [12]. Ce terme <<nano fluide>> a été introduit par **choi (1995)**, et reste couramment utilisé pour désigner ce type de suspension [27].

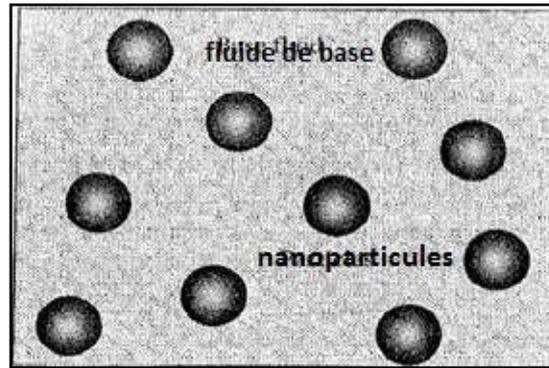


Figure II.9 : Représentation schématique de nano fluides [42]

II.4.1.1. Les nanoparticules : est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes conduisant à un objet dont la taille est inférieure à 100 nm. Les nanoparticules se situent entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire [11]. Elles représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur permettant des innovations très prometteuses dans de nombreux domaines fondamentaux tels que : la santé, l'énergétique ou l'industrie [43].

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides sont [11] :

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

Les liquides de base les plus utilisés sont:

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

II.4.1.1.1. Types de nanoparticules : les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories [12] :

* 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, dioxyde de titane TiO_2).

* Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , les nanotubes de silicium Si...).

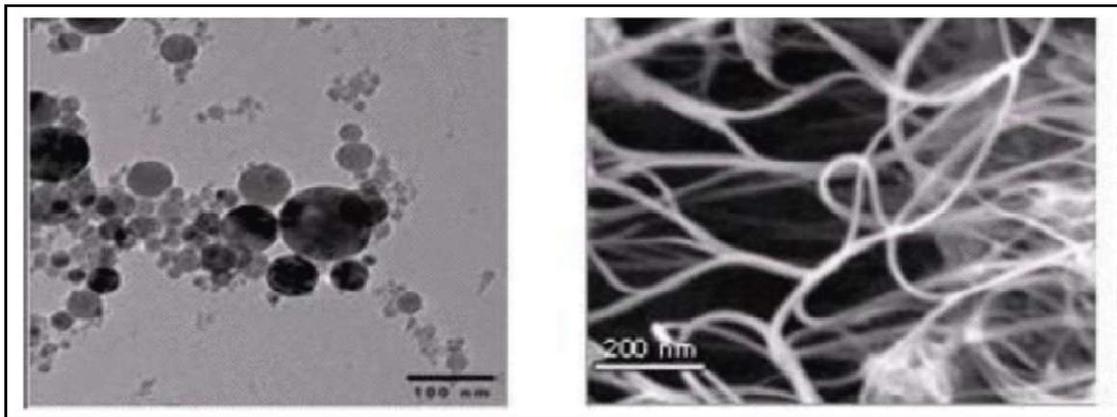


Figure II.10 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone (Bang et Chang, 2005) [12]

II.4.1.1.2. Fabrication de nanoparticules: il existe plusieurs techniques de fabrication de nanoparticules telles que la condensation gazeuse, l'usure mécanique ou encore la précipitation chimique, l'une des méthodes les plus utilisées en laboratoire est celle de la production de nanoparticules par la condensation gazeuse , brièvement ,la technique de condensation gazeuse implique la vaporisation d'un précurseur métallique ou autre en présence d'un gaz sous pression contrôlée (typiquement un gaz inerte comme l'hélium). La collision entre la vapeur et le gaz inerte entraine la condensation de particules de taille nanométrique du précurseur utilisé. Celle – ci est ensuite récupérée et utilisée comme poudre de nano particules. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de produire des particules sous des conditions plus propres [44].

II .4.2. Les applications des nano fluides : [45]

-Refroidissement des systèmes électroniques : Dans les circuits intégrés, les nano fluides ont été considérés comme fluide de refroidissement. Un nano-fluide à base d'eau est rempli pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

-Refroidissement des systèmes thermiques : Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement.

- 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 thermiques très élevés ($q > 500$ à 1000 W/cm^2), où les nano fluides ont montrés 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

- Refroidissement des systèmes nucléaires : L'institut de technologie da Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour les nouvelles nanotechnologies (nano fluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nano fluides sur la sureté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires.

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

Autres applications :

- Pile à combustible-le chauffage solaire de l'eau-refroidisseurs réfrigérateur domestique, Diesel combustion, Forage, Lubrifiants, stockage thermique et caloducs [16].

II. 4.3. Les avantages des nano fluides: [45]

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.

- Haute 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.

II.4.4. Les inconvénients des nano fluides : [45]

-Fortes pertes de charge.

-Erosion.

-Sédimentation.

-Bouchons dans les écoulements.

-Le coût élevé des nano fluides.

-Difficultés dans le processus de production.

II .4.5. Fabrication des nano fluides: La préparation des nano fluides est une étape clé puisque leur stabilité en dépend. Il existe deux techniques de fabrication des nano fluides : La méthode en une étape et la méthode en deux étapes. [46]

- **Dans la méthode en une étape**, les nanoparticules sont directement synthétisées et dispersées dans le fluide de base par réactions chimiques ou procédés physiques. Cette méthode reste cependant limitée par son coût élevé et par la difficulté à synthétiser des particules à large échelle. Étant donné que les particules ne sont pas séchées, stockées et dispersées ensemble, le risque d'agglomération est généralement réduit avec la méthode en une étape ce qui améliore leur stabilité.
- **La méthode en deux étapes** est la plus utilisée dans la littérature. Les nanoparticules sont dans un premier temps synthétisées en tant que poudre sèche puis dispersées dans un fluide. Le mélange est ensuite agité mécaniquement et/ou soumis à des ultrasons dans le but de l'homogénéiser et de casser les agglomérats de particules. Cette méthode reste peu coûteuse et peut être facilement utilisée à grande échelle puisque les procédés de synthèse de nanoparticules sont déjà connus et industrialisés.

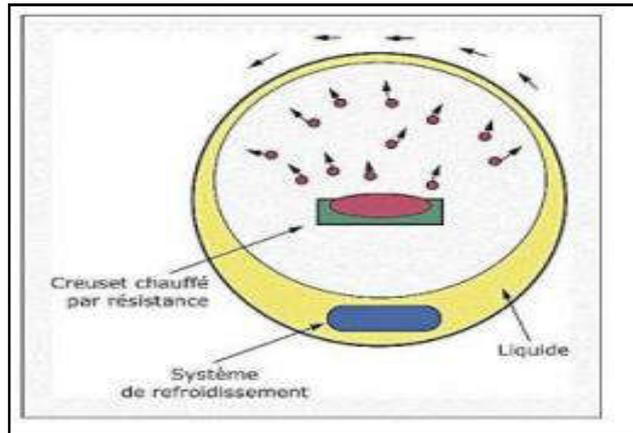


Figure II.11 : Procédé de synthèse du nano fluide en une seule étape [27]

II. 4.6. Propriétés thermo-physiques des nano fluides et les modèles utilisés :

Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc.). De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante [47].

II. 4.6.1. La fraction volumique : [48]

$$\varphi = \frac{V_s}{V_T} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{II.13})$$

Où V_s : Volume de solide (nanoparticules).

V_T : Volume totale (nanoparticules + fluide de base).

II.4.6.2. La masse volumique :

Pour la détermination de la masse volumique d'un nano fluide parfaitement homogène en fonction de la fraction volumique φ à une température T donnée. On doit revenir à la définition de la masse volumique de ce mélange. [11,48]

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_s + V_f} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{II.14})$$

Et on a la fraction volumique : $\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f}$

On en déduit alors la masse volumique d'un nano fluide :

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (\text{II.15})$$

Où ρ_{nf} : La masse volumique du nano fluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides.

II.4.6.3. La chaleur spécifique : La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = dQ/m dT$. [11]

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide, on peut citer les deux modèles suivants les plus rencontrés dans la littérature: [1]

- **Modèle Pak et cho:**

$$(C_p)_{nf} = \varphi (C_p)_s + (1 - \varphi) (C_p)_f \quad (\text{II.16})$$

- **Modèle du Xuan et Roetzel :**

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi (\rho C_p)_s + (1 - \varphi) (\rho C_p)_f \quad (\text{II.17})$$

II.4.6.4. La viscosité dynamique : 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 [48].

Les différents modèles de viscosités [48] :

- **Modèle d'Einstein :**

La viscosité dynamique d'un nano fluide pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides est donnée par la relation suivante:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5 \varphi \quad (\text{II.18})$$

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

- **Modèle de Brinkman** : Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'elle puisse être utilisée dans une large plage de concentration de fraction volumique.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II.19})$$

- **Modèle de Batchelor** : Batchelor a montré que la viscosité est une fonction non linéaire de φ avec la présence d'un terme en φ^2

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5 \varphi + 6.2 \varphi^2) \quad (\text{II.20})$$

D'autres relations issues des mesures expérimentales sont citées dans la littérature, exemples:

- **Modèle de Maiga et al.** :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3 \varphi + 123 \varphi^2) \quad (\text{II.21})$$

- **Modèle de Pak et Cho** :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11 \varphi + 533.9 \varphi^2) \quad (\text{II.22})$$

II.4.6.5. La conductivité thermique : est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. [12]

Une grande partie des travaux traitant des nano fluides porte sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique. Une loi empirique appelée loi des mélanges, était proposée par S.K.Das et al : [48]

$$k_{eff} = \left[1 + \varphi \left(\left(\frac{k_s}{k_f} \right)^n - 1 \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (\text{II.23})$$

Pour $n=1$ cette loi devient la loi de mélange parallèle :

$$k_{eff} = \left[1 + \varphi \left(\left(\frac{k_s}{k_f} \right) - 1 \right) \right] \quad (\text{II.24})$$

Cette équation indique que la conductivité thermique effective d'un mélange est simplement une combinaison linéaire du rapport de la conductivité thermique des particules et du fluide de base.

II.4.6.5.1. Les modèles théoriques :

A/Modèle de Maxwell : s'intéresse au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour arriver à l'estimation de ce dernier il a supposé que le fluide contient plusieurs particules sphériques du même diamètre. La formule de Maxwell est donnée par : [49]

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} k_f \quad (\text{II.25})$$

Où k_{nf}, k_f, k_s : désignent respectivement les conductivités thermiques du nano fluide, du fluide de base et des particules solides.

Ce modèle est valable pour des petites concentrations des particules.

B/ Modèle de Hamilton-Crosser : Le modèle de Hamilton est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Pour prendre en compte cette diversité de forme, Hamilton introduit un facteur géométrique appelé sphéricité (ψ) faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. [11]

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_s)} k_f \quad (\text{II.26})$$

Où : n est un facteur de forme empirique donné 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-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. Ils ont proposé de modéliser les nano fluides 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 est plus grande que la conductivité thermique de liquide. [11]

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2\varphi(k_s - k_f)(1 + \beta)^3}{k_s + 2k_f - \varphi(k_s - k_f)(1 + \beta)^3} k_f \quad (\text{II.27})$$

Où : β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

D/ Modèle de Bruggeman : Le modèle propose par Bruggeman semble mieux approximer certains résultats expérimentaux compare aux autres modèles pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules [11].

$$k_{nf} = \frac{(3\varphi-1)\frac{k_s}{k_f} + [3((1-\varphi)+\sqrt{\Delta})]}{4} k_f \quad [49] \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$k_{nf} = \left[(3\varphi - 1)\left(\frac{k_s}{k_f}\right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2)\left(\frac{k_s}{k_f}\right) \right] \quad [49] \quad (\text{II.29})$$

Il existe plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux utilisées pour calculer la conductivité thermique des différentes nano fluides. [11]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 28.905 \varphi^2 + 2.8273\varphi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (EG+Al}_2\text{O}_3)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = -13\varphi^2 + 6.3\varphi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (Al}_2\text{O}_3 \text{ +eau)}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 7146 \varphi^2 + 76.6\varphi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (huile+NTC)}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 11.6 \varphi^2 + 9.6 \varphi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (Cu+eau)}$$

II.4.6.6. Coefficient d'expansion volumique (β) :

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 : [16]

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (\text{II.30})$$

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nano fluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano fluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique l'expression suivante : [16]

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (\text{II.31})$$

II.4.7. Nano fluides hybrides :

Les nano fluides hybrides ont été étudiés pour la première fois par **Jona et al. (2007)**, pour améliorer la conductivité thermique. Ils sont une catégorie développée de nano fluide formée par une combinaison de deux ou plusieurs types de nanoparticules en suspension dans un fluide de base.

Les nanoparticules hybrides pourraient être synthétisées par des méthodes chimiques ou physiques [49]. Le choix de ces matériaux nanoparticulaires est assez essentiel [16]. La composition des nanoparticules utilisées pour fabriquer l'hybride les nano fluides peuvent être divisés en trois catégories différentes, en fonction de leur taper : [50]

1. Composés métalliques tels que : Al_2O_3/Cu , Al_2O_3 /Ni , MgO/Fe , et Al/CNT .

3. Composé polymère tels que polymère/ CNT et polymère/ TiO_2 .

3. Composé céramique : Al_2O_3/Cu , Al_2O_3 /Ni , MgO/Fe , et Al/CNT .

La masse volumique du nano fluide hybride (ρ_{hnf}), sa capacité calorifique ($\rho C_p)_{hnf}$ ainsi que son coefficient d'expansion thermique ($\beta)_{hnf}$ sont calculés par le biais des lois de mélanges donnés par les équations suivantes: [16]

La masse volumique :

$$\rho_{hnf} = (1-\varphi_2)[(1-\varphi_1)\rho_f + \varphi_1\rho_1] + \rho_2\varphi_2 \tag{II.32}$$

La capacité calorifique :

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1-\varphi_2)[(1-\varphi_1)(\rho C_p)_f + \varphi_1(\rho C_p)_1] + (\rho C_p)_2\varphi_2 \tag{II.33}$$

Coefficient d'expansion thermique :

$$(\beta)_{hnf} = [(1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi_1\beta_1\rho_1 + \varphi_2\beta_2\rho_2] / \rho_{hnf} \tag{II.34}$$

La conductivité thermique :

$$k_f = \frac{(k_{hp} + 2k_f) - 2\varphi(k_f - k_{hp})}{(k_{hp} + 2k_f) + \varphi(k_f - k_{hp})} \tag{II.35}$$

$$k_{hp} = \frac{\varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2}{\varphi} \quad \text{avec : } \varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

La viscosité dynamique :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi_1)^{2.5}(1-\varphi_2)^{2.5}} \quad (\text{II.36})$$

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés généralités sur le transfert de chaleur, les milieux poreux et les nano fluides et aussi une modélisation thermo-physique des nano fluides. Dans le chapitre suivant on va présenter la modélisation mathématique de notre phénomène physique.

Chapitre III :
Modélisation mathématique

III.1. Introduction :

Le but de cette partie, est d'évaluer le comportement d'un écoulement laminaire, cette partie est consacrée à la modélisation et la mise en équations du problème (Équation de continuité, Équation de quantité de mouvement, Équation d'énergie) avec les conditions aux limites et faire apparaître les nombres adimensionnels de référence et ainsi que les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et fluide de base utilisés dans cette simulation.

III.2. Définition de géométrie :

Une géométrie triangulaire à l'intérieure se trouve une cavité contenant un milieu poreux avec un modèle d'écoulement bidimensionnel 2D en régime de la convection laminaire ; les dimensions utilisées sont 20 cm pour le premier triangle et 6 cm pour la cavité ; (Triangles équilatéraux).

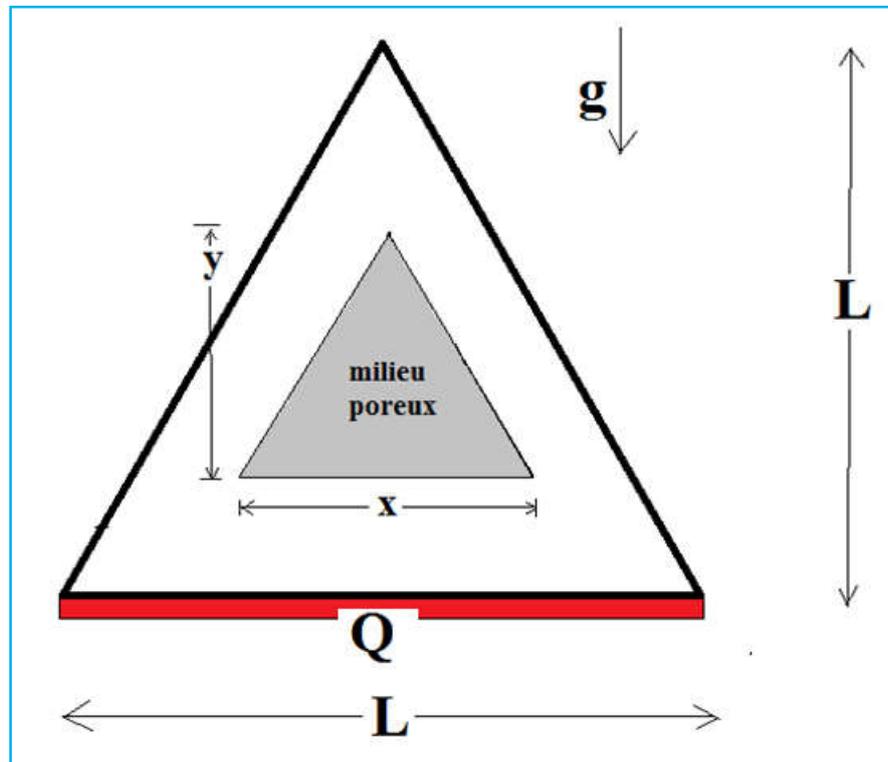


Figure III.1 : Géométrie du problème

III.3. Equations gouvernantes : [3]

Les équations gouvernante de l'écoulement en régime laminaire sont :

- La loi de conservation de la masse.
- Deuxième loi de Newton (principe de conservation de la quantité de mouvement).
- Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique).

III.3.1. la vitesse de Darcy et l'équation de continuité :

La méthode de prise de moyenne permet d'établir une équivalence entre le milieu dispersé et réel et le milieu continu fictif. On introduit la notion de vitesse de filtration \vec{v} , qui correspond à la vitesse moyenne du fluide prise sur un volume V_p (comprenant à la fois la matière solide et liquide) et on distingue aussi la vitesse intrinsèque \vec{v}_{int} qui correspond à la vitesse moyenne du fluide prise sur volume V_f du milieu constitué uniquement de volume liquide.

La relation entre la vitesse de Darcy et la vitesse intrinsèque est :

$$\vec{v} = \Phi \vec{v}_{int} \quad (III.1)$$

La relation (III.1) est connue par la relation Dupuit-Forchheimer.

L'équation de conservation de la masse dans un milieu poreux s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\Phi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \vec{v}) = 0 \quad (III.2)$$

III.3.2. Equation de quantité de mouvement :

On utilise le modèle générale de Darcy –Brinkman-Forchheimer décrivant l'écoulement du fluide au sein du milieu poreux en prenant en considérations les forces visqueuses et les forces d'inerties.

L'équation de conservation de quantité de mouvement dans le milieu poreux s'écrit sous la forme :

$$\rho \left[\frac{1}{\Phi} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\Phi} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{v}\vec{v}}{\Phi} \right) \right] = -\frac{1}{\Phi} \vec{\nabla}(\Phi \rho) + \rho \vec{g} + \frac{\mu_{eff}}{\Phi} \nabla^2 \vec{v} - \frac{\mu}{K} \vec{v} - F \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{v}| \vec{v} \quad (III.3)$$

III.3.3. Equation d'énergie en milieu poreux :

L'équation de l'énergie (ou les équations de l'énergie selon le concept adopté) traduisant le transfert de chaleur dans le milieu poreux fait appel au concept de milieu fictif, équivalent au milieu poreux réel.

Afin d'obtenir une description macroscopique des phénomènes de transfert dans un volume élémentaire représentatif de milieu poreux, il faudrait établir l'équation (ou les équations) de transfert de chaleur. Pour cela, on procède à la notion d'équilibre local. Cette dernière est largement utilisée.

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f \vec{v} \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} (k_{eff} \vec{\nabla} T) + q_m''' \quad (III.4)$$

Où :

$$(\rho C_p)_{eff} = (1 - \Phi)(\rho C_p)_s + \Phi (\rho C_p)_f$$

ρ : La masse volumique du fluide considéré.

Φ : La porosité du milieu poreux

$(\rho C_p)_{eff}$: La capacité calorifique effective.

$(\rho C_p)_f$: La capacité calorifique du fluide.

k_{eff} : La conductivité thermique effective.

$q_m''' = (1 - \Phi)q_s''' + \Phi q_f'''$: Source d'énergie.

III.4. Hypothèses simplificatrices :

Pour établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème on adopte les hypothèses suivantes :

- La cavité poreuse est isotrope, homogène, perméable et non déformable.
- Le nano fluide hybride est newtonien et incompressible.
- L'écoulement est laminaire bidimensionnel.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- Les propriétés thermo physiques du nano fluide hybride (μ, k, C_p, ν) sont supposées constantes hormis la masse volumique qui obéit à l'approximation de **Boussinesq-Oberbeck** dans le terme de la poussée d'Archimède.

III.4.1. Approximation de Boussinesq-Oberbeck :

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 ($\rho = \rho_0$). Sauf au niveau du terme de gravité. La variation de la température est donnée comme suit :

$$\rho_f = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \tag{III.5}$$

Où :

ρ_0 : Est la densité du fluide à une température de référence T_0 .

β : Le coefficient de dilatation thermique.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p=cte}$$

L'approximation Boussinesq est valable à condition que les changements de la masse volumique $\Delta\rho$ reste faible par rapport à ρ_0 dans toute a région de l'écoulement et à condition que les variations de température sont insuffisantes pour provoquer les différentes propriétés du milieu (liquide et solide) pour faire varier de façon significative de leur valeurs moyennes.

III.5. Equations du problème :

III.5.1. L'équation de continuité :

L'équation de continuité dans un écoulement bidimensionnel incompressible s'écrit de la manière suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (III.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (III.7)$$

u et v étant les composants du champ de vitesse \vec{v} (u, v) dans la direction x et y respectivement.

III.5.2. Equation de la quantité de mouvement :

Suivant x :

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\Phi^2} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v}{\Phi} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{v}{K} u - \frac{F}{\sqrt{K}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (III.8)$$

Suivant y :

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\Phi^2} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v}{\Phi} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{v}{K} v - \frac{F}{\sqrt{K}} v \sqrt{u^2 + v^2} + g\beta(T - T_0) \quad (III.9)$$

III.5.3. Equation d'énergie en milieu poreux :

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_{hnf} \vec{V} \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} (k_{eff} \vec{\nabla} T) + q_m''' \quad (III.10)$$

Pour notre cas il n'y a pas de génération de chaleur donc $q_m''' = 0$.

On divise l'équation (III.10) par $(\rho C_p)_{hnf}$.

Avec :

$$\frac{k_{hnf}}{(\rho C_p)_{hnf}} = \alpha: \text{Coefficient de diffusion thermique.}$$

$$\frac{k_{eff}}{k_{hnf}} = k_{eff.hnf} : \text{Rapport des conductivités thermiques.}$$

Donc l'équation (III.10) devient :

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} (k_{eff.hnf} \alpha \vec{\nabla} T) \quad (III.11)$$

Donc:

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff.hnf} \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{eff.hnf} \alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (III.12)$$

Où :

σ : Rapport de la capacité calorifique du milieu poreux et celle du milieu nano fluide hybride.

III.6. Les nombres adimensionnels:

III.6.1. Le nombre de Grashof Gr :

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Franz Grashof, ingénieur allemand. On le définit de la manière suivante : [26]

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (III.13)$$

L : La longueur caractéristique entre la paroi chaude et froide.

III.6.2. Le nombre de Rayleigh Ra :

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide: inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection naturelle qui devient importante. On peut la définir comme le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl. Ce nombre porte le nom de lord Rayleigh, physicien anglais. On le définit de la manière suivante : [26]

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = Gr Pr \quad (III.14)$$

III.6.3. Le nombre de Nusselt Nu :

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. En cas de présence de convection (due par exemple au déplacement du fluide) aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infinie. [26]

On le définit de la manière suivante :

$$N_u = \frac{h L_C}{k} \quad (\text{III.15})$$

h : coefficient de transfert thermique

L_C : Longueur caractéristique.

k: conductivité thermique du fluide.

III.6.4. Nombre de Prandtl:

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique. On le définit de la manière suivante : [6]

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{III.16})$$

III.6.5. Nombre de Darcy:

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la perméabilité du milieu et l'aire de section transversale (généralement le diamètre de pore au carré) : [3]

$$Da = \frac{K}{L^2} \quad (\text{III.17})$$

III.7. Les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et fluide de base :

Les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et fluide de base sont présentées dans le tableau (III.1) :

Propriétés	H ₂ O	Cu	AL ₂ O ₃
ρ (kg/m ³)	997.1	8954	3970
Cp (J/kg.)	4179	383	765
k (W/m. k)	0.613	400	40
μ (kg/m. k)	0.001002	-	-
β (k ⁻¹)	21×10^{-5}	16.67×10^{-6}	8.5×10^{-6}

Tableau III.1 : Les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et fluide de base.

III.8. Conditions aux limites : Les conditions aux limites dynamiques et thermiques sont désignées dans le tableau suivant :

Limites	Conditions dynamiques	Conditions thermiques
Paroi gauche	$v=y=0$	adiabatique
Paroi droite	$v=y=0$	adiabatique
Paroi inferieure	$v=y=0$	T_h
A l'interface entre la paroi du milieu poreux et le fluide	$V_f=V_p$	$T_f=T_p$

Tableau III.2 : Conditions aux limites

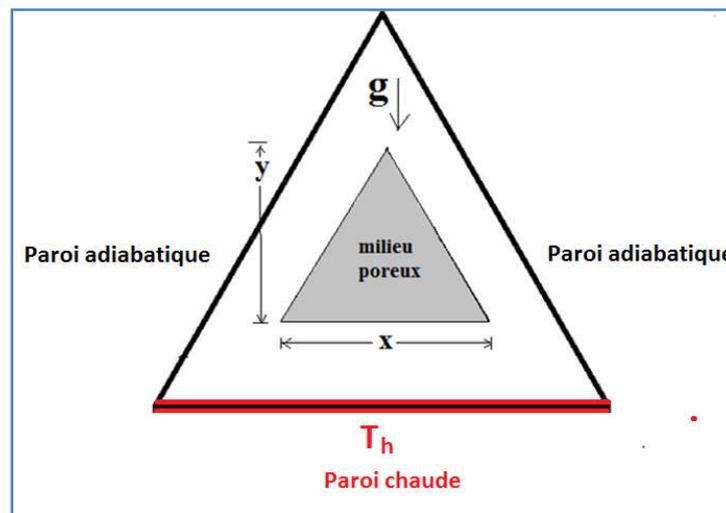


Figure III.2 : Conditions aux limites

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la géométrie de notre problème, les équations gouvernantes de l'écoulement laminaire, les hypothèses, les conditions aux limites et aussi les propriétés thermo-physiques de nanoparticules et de fluide de base. Le chapitre suivant on va présenter la simulation numérique de notre problématique.

Chapitre IV :
Simulation Numérique

IV.1. Introduction :

La simulation numérique en mécanique des fluides occupe une place prépondérante, aussi bien dans le monde de la recherche que dans la plupart des processus industriels impliquant des écoulements des fluides.

Aussi bien dans la nature (Climat, atmosphère, astrophysique, marées, vagues, ...), qu'en industrie (Hydrocarbures, stations électriques, stations nucléaires, ...), qu'en énergie nouvelles et renouvelables (Hydrodynamique, éolienne, solaire,...), qu'en aérodynamique (Aérospatiale, aéronautique, ...), qu'en biomédical (Écoulements sanguin, produits pharmaceutiques, ...) , qu'en confort thermique (Ventilation, chauffage, isolation, ...) et qu'en génie civil et environnement (Dissipation des polluants, barrages, vents sur bâtiments...), la mécanique des fluides est la principale branche de la physique qui contribue à la modélisation de tous ces phénomènes physiques [51].

Dans la majorité des cas, ces phénomènes physiques sont très complexes et chaotiques, et leurs équations de transport sont des équations différentielles fortement non-linéaires et couplées à d'autres équations (Magnétohydrodynamiques, Turbulence, Milieux poreux,...etc). Et à l'heure actuelle, ces équations sont pratiquement impossibles à résoudre analytiquement.

Le principe de simulation numérique en mécanique des fluides, ou la CFD (Computational Fluid Dynamics), est de résoudre les équations différentielles par différentes méthodes numériques (Différences finis, volumes finis, éléments finis, méthodes spectrales). La résolution numérique a pour but de transformer un modèle physique continu en un modèle mathématique discret qui sera résolu par un programme informatique. [51].

La CFD a commencé à se développer en génie mécanique, pour étudier les écoulements autour d'un objet afin de mieux le profiler (ailes d'avions, automobiles). Dans le domaine du génie chimique, les problèmes sont, en général, beaucoup plus complexes de par, en particulier, le caractère multiphasique des écoulements, les réactions chimiques et le comportement rhéologique des fluides.

Dans ce présent chapitre, on traite l'augmentation de l'efficacité du refroidissement et les échanges thermiques. Principalement à l'aide du logiciel Workbench ANSYS qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD).

ANSYS est un code de simulation numérique qui permet la réalisation de géométrie et du maillage jusqu'à l'obtention d'une solution.

IV.2. Procédure du calcul :

Le Workbench est un logiciel permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique.



Figure IV.1 : Fenêtre lancement du logiciel

IV.2 .1. Menu principal du logiciel:

Pour démarrer Workbench. Un nouveau projet s'ouvre automatiquement. Choisissez dans la Boite à outils => Système d'analyse => Mécanique de fluide (Fluent) (en haut à gauche), cliquez-glissez jusque dans l'espace de travail (Figure IV.2).

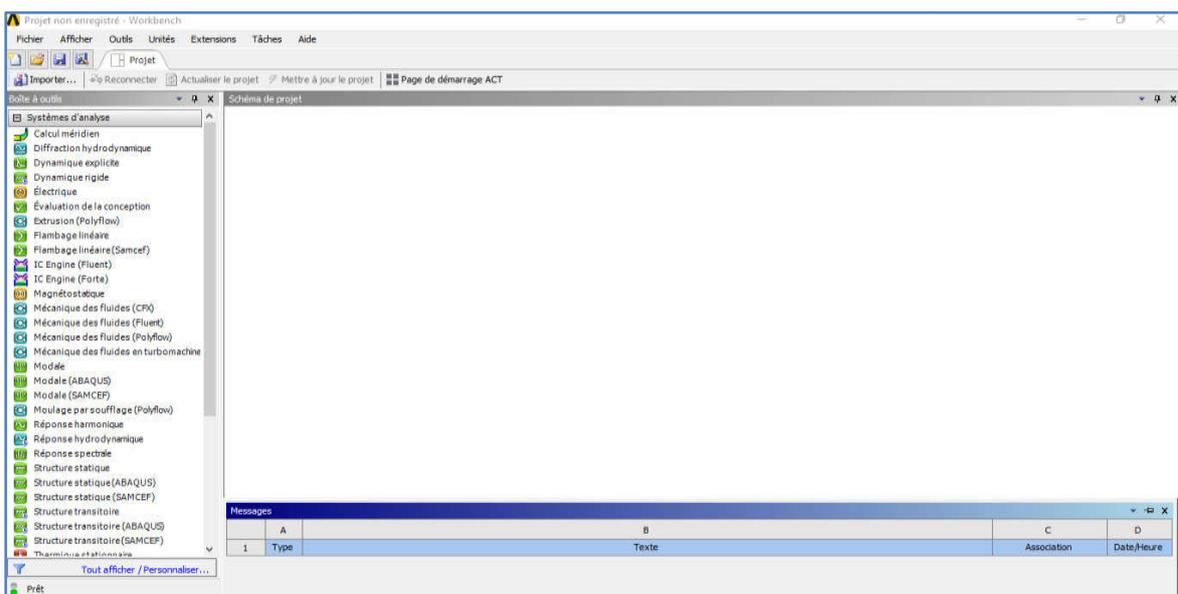


Figure IV.2 : Menu principal de Workbench

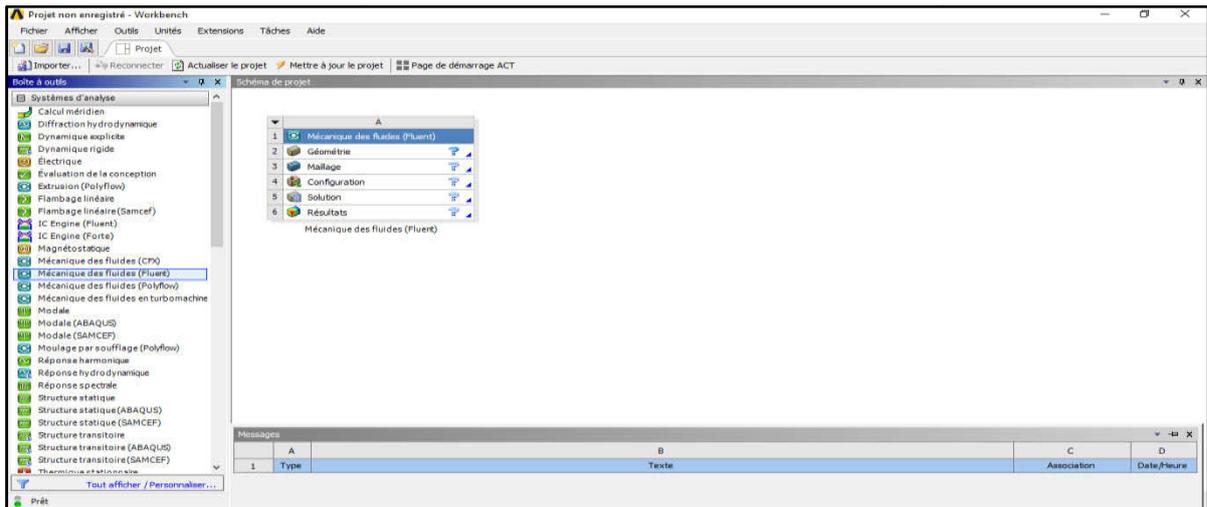


Figure IV.3 : Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide.

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes:

1. Géométrie : Tout d'abord, le logiciel vous demande de choisir l'unité caractéristique du système, dans cas il s'agit du centimètre.

Pour créer une géométrie, il faut :

Commencer par la tracer grossièrement (juste les formes),

Préciser les côtes,

Transformer le dessin en *edge* (bord de la géométrie pour le maillage),

Préciser les zones et leur nature (fluide ou solide).

Donc utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.

2. Maillage :

Nous allons créer le maillage, pour cela, lancez Mesher en double cliquant sur Maillage dans la boîte Workbench. Une fois lancé, la première chose qu'il vous demande est la méthode de maillage (Méthode automatique, des triangles seuls, ou des quadrilatères /triangles MultiZone).

Pour nommer une partie, il faut la sélectionner => clic droit => Créer la sélection nommée => lui donner un nom. Pour sélectionner une partie de la géométrie, il faut avoir l'outil en conséquence : pour les surfaces, pour les arrêtes. En appuyant sur Ctrl vous pouvez sélectionner plusieurs éléments.

Donc cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées et réseau de communication dans le module de simulation mécanique.

3. **Configuration** : permet de définir les charges et conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse.
4. **Solution** : la solution cellulaire permet d'accéder aux données.
5. **Résultats** : cette cellule combine les résultats de l'analyse.

IV.2 .2. Création de la géométrie :

Pour créer une géométrie de notre problème, avec ANSYS Workbench en double cliquant sur la géométrie pour ouvrir le module de création géométrique «Design Modeler ».

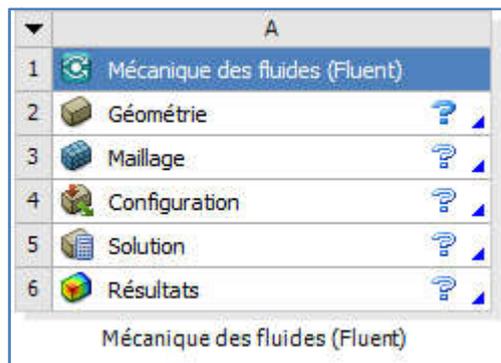


Figure IV.4 : Création d'un projet en mécanique de fluide.

Sélectionner le centimètre (cm) comme unité de dimension à partir de la liste « unité ».

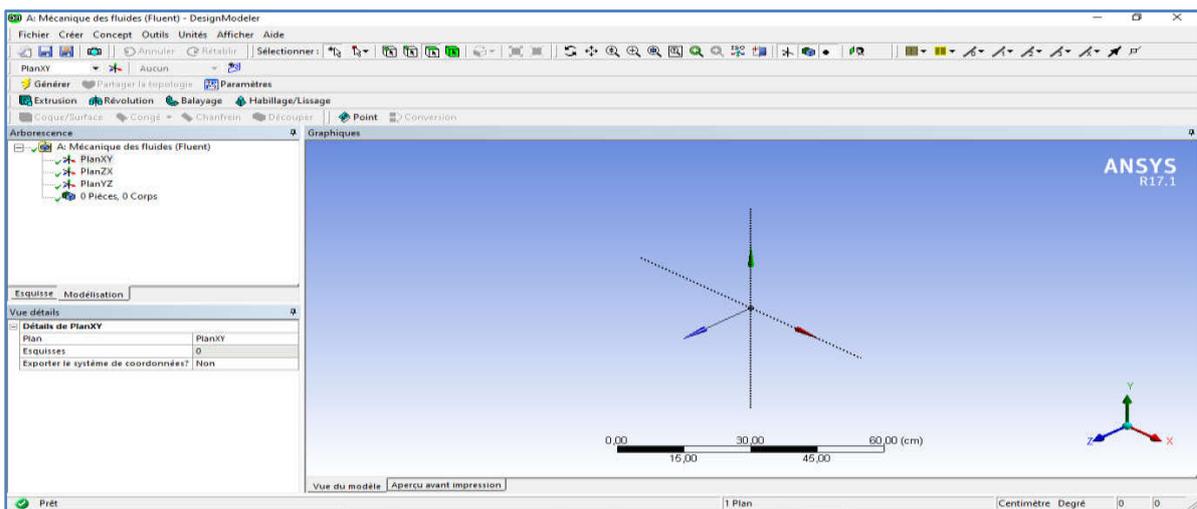


Figure IV.5 : Création du modèle de la géométrie.

Ensuite ; choisir le plan de travaille en cliquant sur le plan XY, puis sur l'icône  :

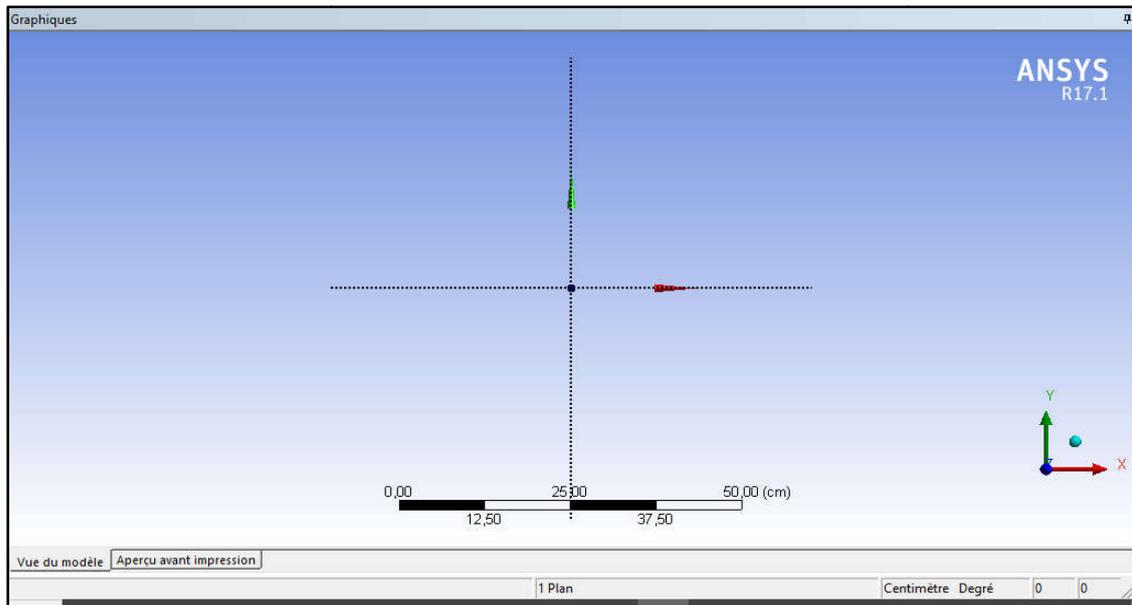


Figure IV.6 : Création du modèle (plan de vue).

Cliquer sur la boîte à outils Esquisse afin de créer la géométrie, et indiquer les dimensions et convaincantes :

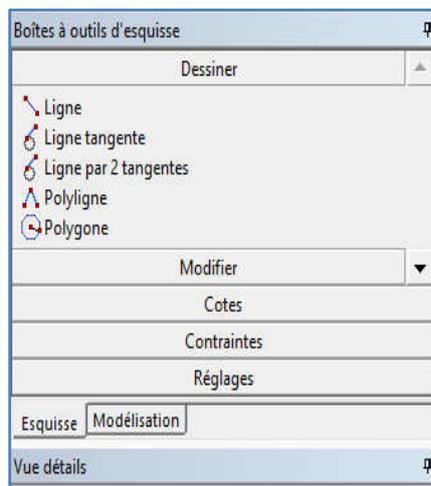


Figure IV.7 : Création d'esquisse.

On obtient cette esquisse ;

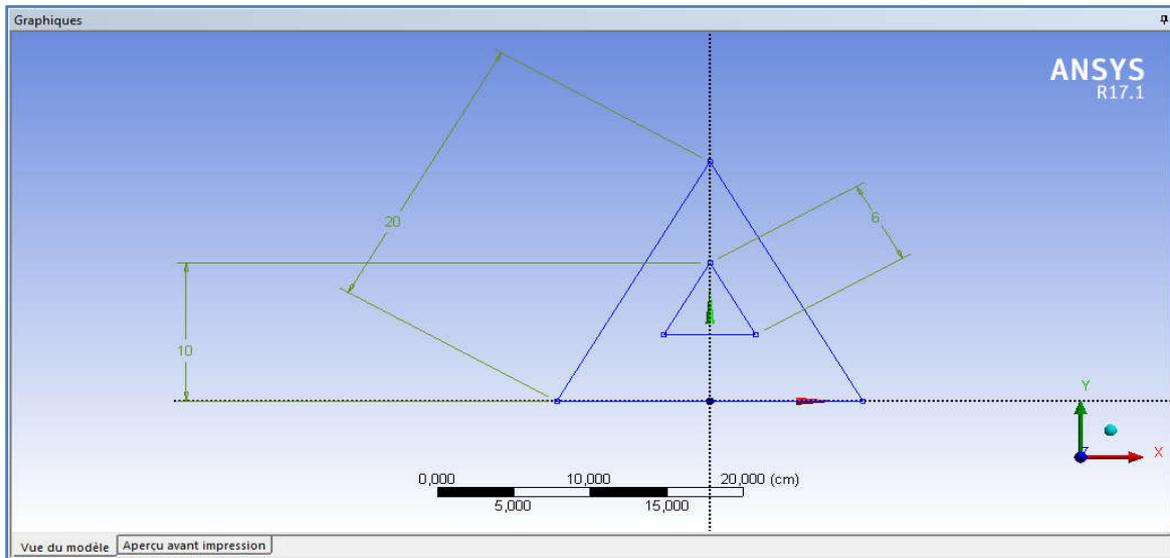


Figure IV.8 : Création d'esquisse.

Puis la définition des surfaces :

- concept surface à partir d'esquisse.
- sélectionner esquisse.
- appliquer et générer.

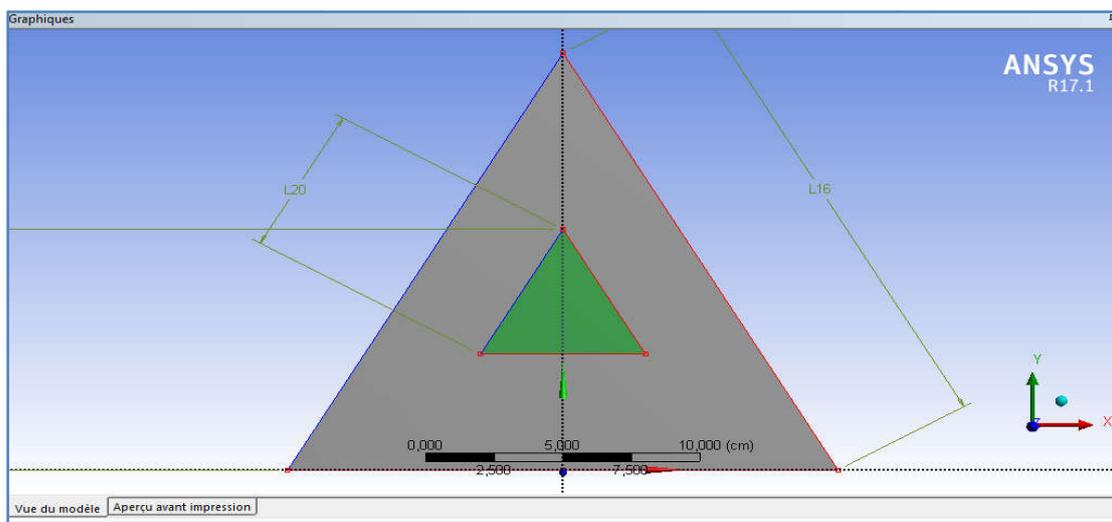


Figure IV.9 : la définition des surfaces

Préciser la zone de fluide.

Sauvegarder la géométrie et quitter Design Modeler pour passer à l'étape de maillage.

IV.2 .3. Le maillage :

Lancer le logiciel de maillage depuis ansys-Workbench, en double cliquant sur Maillage.

Choisir la méthode de maillage « méthode des triangles seuls ».

Nommer différentes parties de la géométrie pour définir les conditions aux limites et les conditions sur le maillage : bottom- left-right-interior-interior-fluid-interior-milieu.

On sélectionne toutes les Sélections Nommées dans l'arborescence

On sélectionne Dimensionnement dans Maillage, on choisit le nombre de division puis on sélectionne les arrêts désirés.

On répète la même démarche pour tous les arrêts. Finalement on clique sur Générer un maillage.

Cliquer sur mettre à jour.

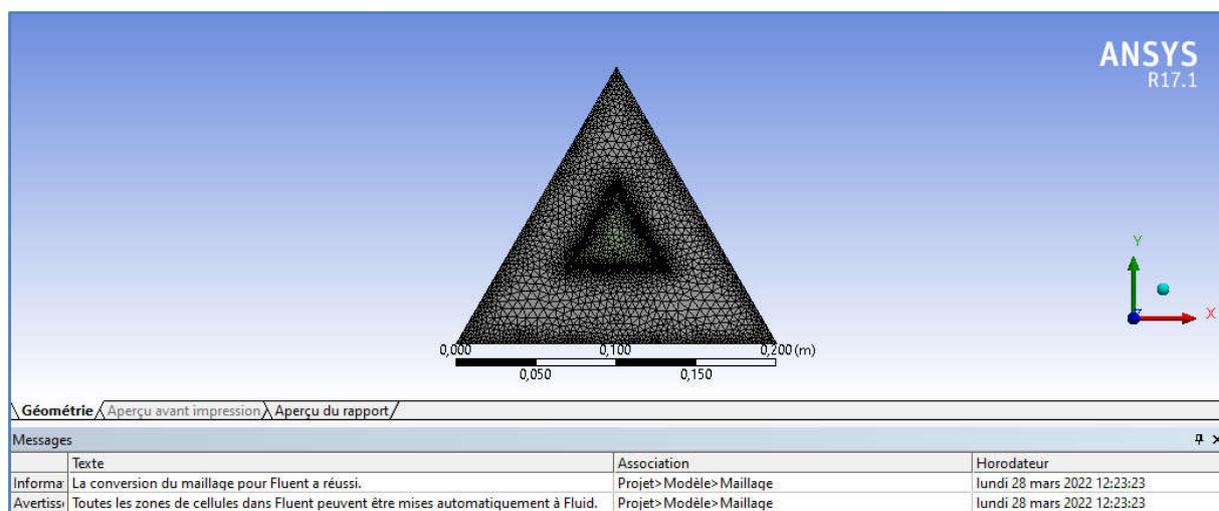


Figure IV.10: le maillage utilisé.

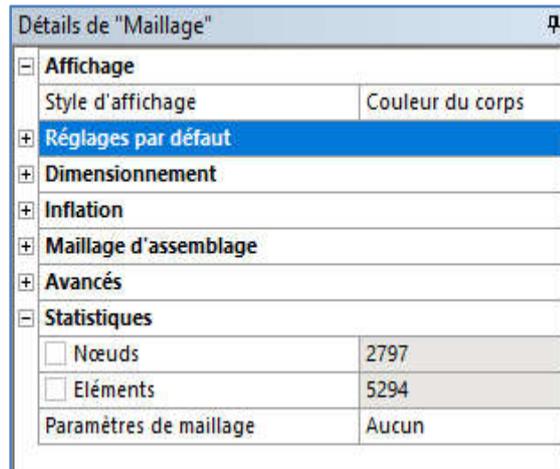


Figure IV.11: les détails de « Maillage ».

IV.2.3.1. Méthode numérique et logiciels :

Les équations de la mécanique des fluides présentées dans la partie précédente sont très complexes et ne peuvent pas être résolues analytiquement. Afin de pouvoir résoudre les équations souhaitées, nous faisons appel à différentes méthodes numériques telles que la méthode des volumes finis, la méthode des différences finies ou encore celle des éléments finis. Le logiciel que nous avons utilisé pendant cette étude est basée sur la méthode des volumes finis.

La discrétisation simplifiée de celle-ci permet une utilisation très fréquente des utilisateurs. Cette méthode s'appuie également sur des lois de conservation locales, et grâce au théorème de Gauss, elle permet de transformer une intégrale de volume en intégrale de surface.

IV.2.3.1.1. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux

nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales. [52]

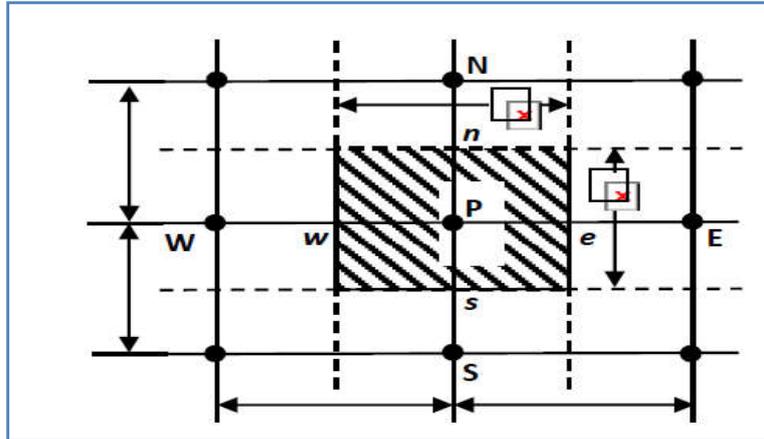


Figure IV.12 : Volume de contrôle bidimensionnel.

IV.2 .4. Configuration :

La configuration sous Workbench on a été réalisé avec double-cliquer sur la configuration dans la boite Workbench ; Des sélections nommées s'affichent automatiquement, qui va nous demander de conditions aux limites.

Model : laminaire, équation de l'énergie.

Matériels : Nous changeons les propriétés thermo-physiques de nano fluides hybride ($AL_2O_3+Cu-H_2O$) ; les propriétés du solide est celles d'aluminium.

Cell zone condition : Nous avons identifié les propriétés de milieu poreux à l'intérieur de la cavité.

Boundary Conditions Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes :

Bottom : température imposée.

Left : température imposée.

Right : température imposée.

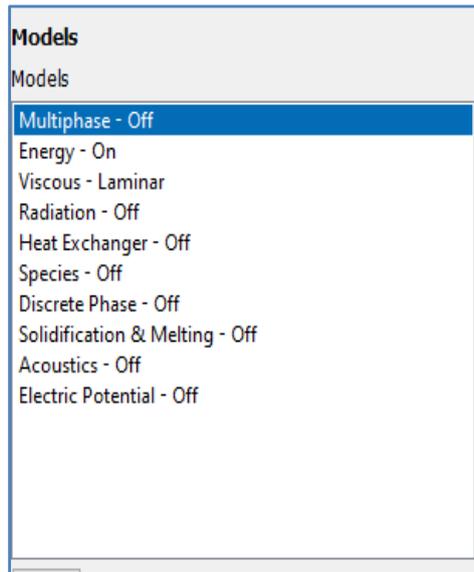


Figure IV.13: Model (laminaire, équation de l'énergie)

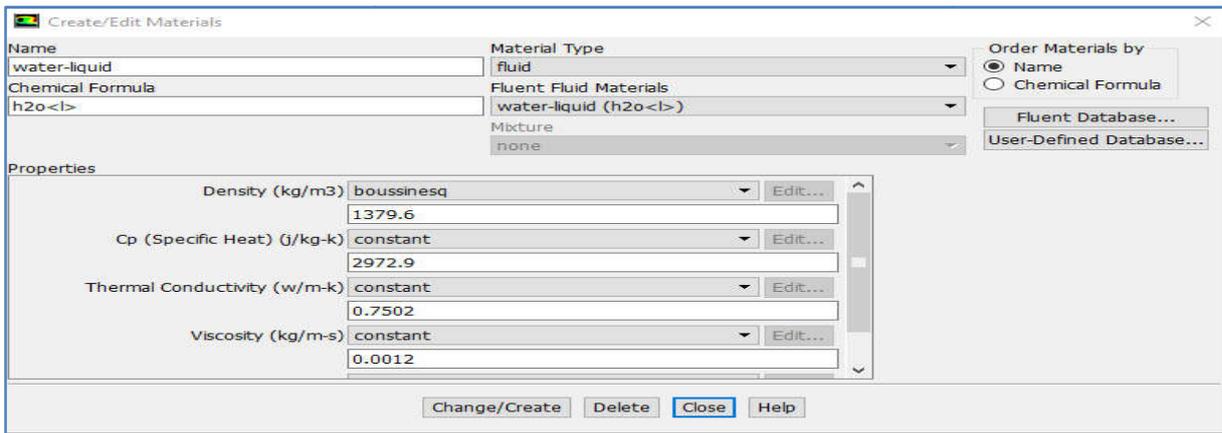


Figure IV.14: Création les données du nano fluide hybride.

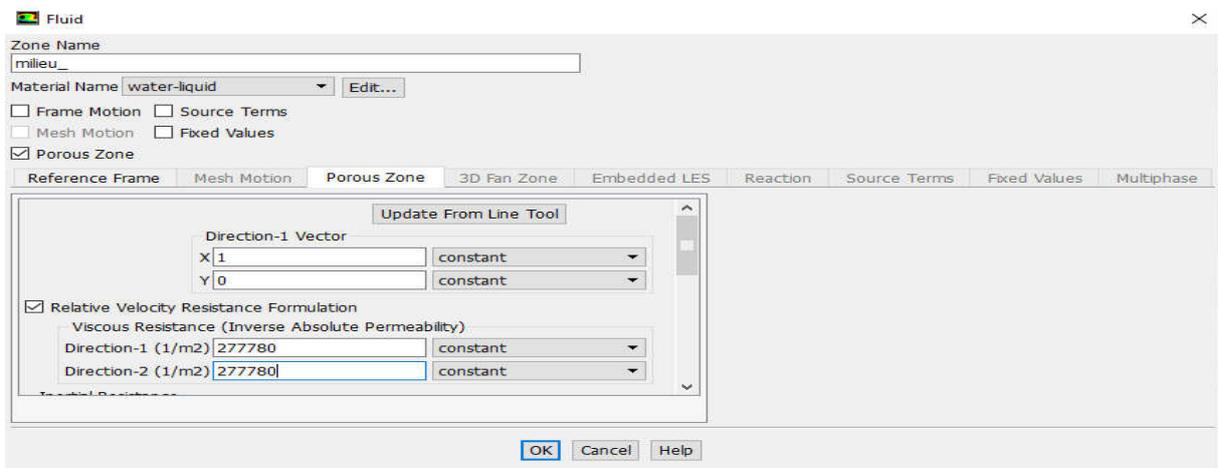


Figure IV.15 : Création les données de milieu poreux.

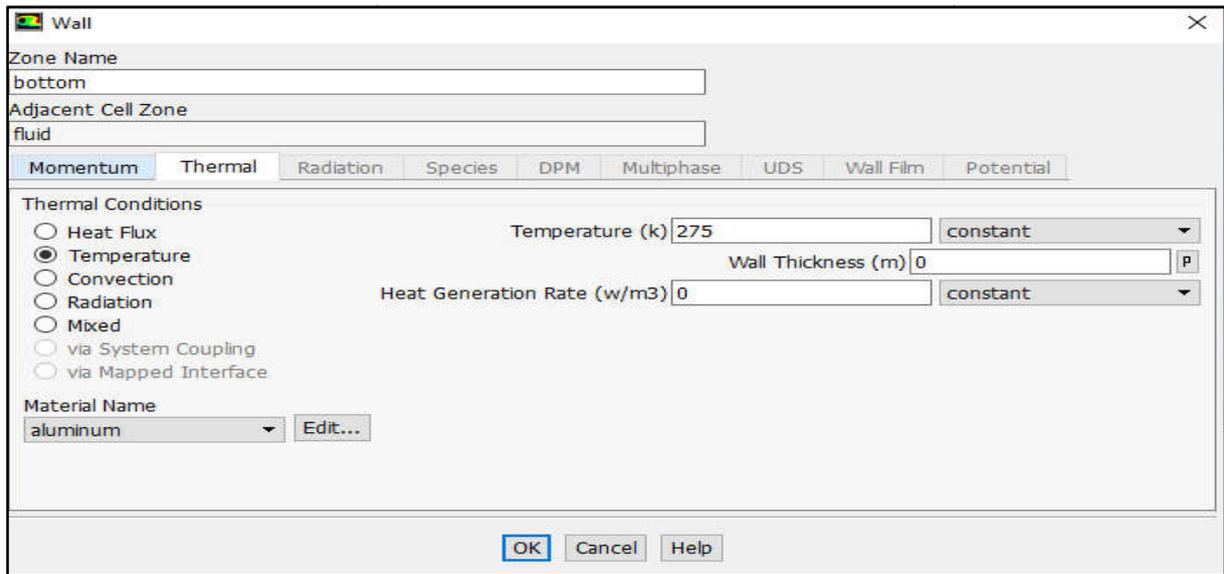


Figure IV.16 : Condition aux limite –bottom- Température imposée.

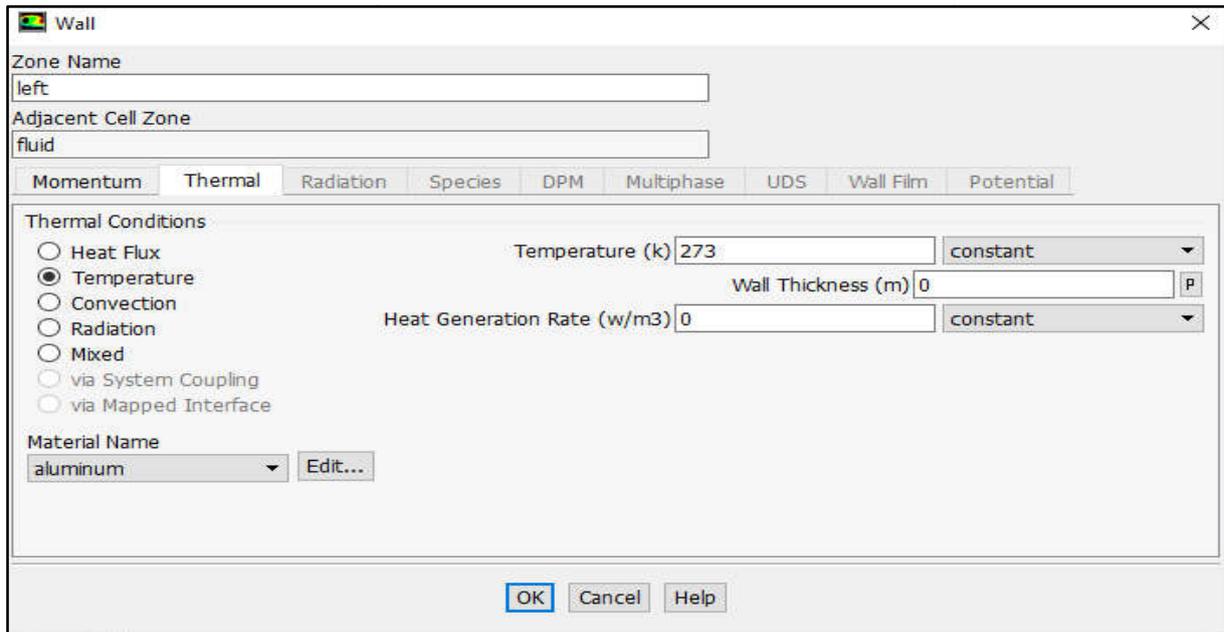


Figure IV.17 : Condition aux limite –left- Température imposée.

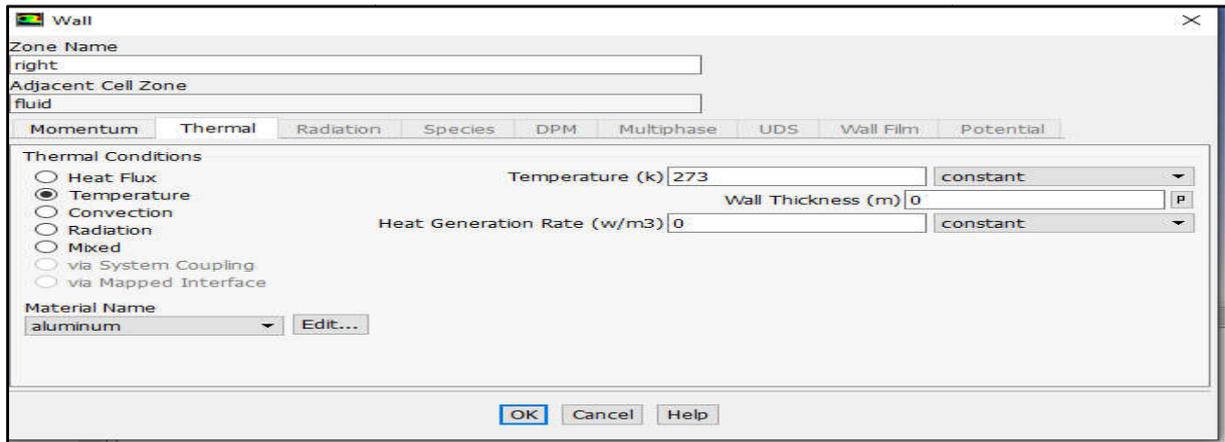


Figure IV.18 : Condition aux limite –right- Température imposée.

IV.3. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté en détail les étapes essentielles d'Ansys et la méthode de l'utiliser, en utilisant la simulation numérique par CFD, nous intéressons à la présentation des champs de température et de la vitesse et le nombre de Nusselt moyen qui sera présentées et discutées dans le chapitre suivant.

Chapitre V :
Résultats et Discussion

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle de nano fluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cu-eau}$) en présence de milieu poreux, dans une cavité triangulaire équilatéral avec une paroi partiellement chauffée. Le gradient de température est entamé à l'aide d'une densité de flux constante. Les résultats numériques ont été obtenus pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh ($10^3 \leq \text{Ra} \leq 10^5$), le paramètre de la fraction volumique solide de nano fluide hybride ($0 \leq \varphi \leq 0.035$) et la dimension du milieu poreux (la porosité et la perméabilité sous forme de nombre de Darcy), afin de distinguer l'effet de ces paramètres sur le champ d'écoulement, la distribution de la température et du nombre de Nusselt. Par rapport à une étude de base correspond au cas de référence où le fluide de travail est de l'eau pure (fraction nulle de nanoparticules).

➤ **Condition aux limites des propriétés thermo physiques pour le nano fluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cu-eau}$):**

De nombreuses autres études ont été menées afin de déterminer les propriétés thermo-physiques, telles que, la conductivité thermique et de viscosité des nano fluides. Quelques-unes des corrélations produites par ces études sont présentées au premier chapitre.

Tableau V.1 : Propriétés thermo-physiques pour le nano fluide hybride.

Fraction volumique de la nanoparticule dans un nano fluide hybride	K (W/m. K)	μ (Kg/m.s)	ρ (Kg/m ³)	Cp (J/kg. K)	β (1/k)
$\varphi=0.01$	0.6502	0.0011	1106.4	3749.3	1.8712×10^{-4}
$\varphi =0.02$	0.6890	0.0011	1215.7	3396.8	1.6893×10^{-4}
$\varphi =0.03$	0.7293	0.0012	1325	3102.6	1.5269×10^{-4}
$\varphi =0.035$	0.7502	0.0012	1379.6	2972.9	1.4579×10^{-4}

V.2. La convergence :

Dans cette étude, les équations de conservation qui gouvernent ce phénomène, avec leurs conditions aux limites sont résolues en utilisant le logiciel commercial Ansys-Fluent (version 17.1). L'algorithme SIMPLE est adopté pour déterminer le champ de température, alors que le schéma QUICK est exploité pour discrétiser les termes de convection dans les équations de mouvements et l'équation de l'énergie. L'outil Maille permet de générer la grille de surface simulée. Le système de grille pour le domaine de calcul est créé en utilisant des cellules

structurées. Afin d'obtenir une solution indépendante de grille, Ceci justifie notre convergence pour toutes les équations gouvernantes, qui ont été résolues de façon itérative et rapide.

Nous avons obtenu une stabilité et convergence de modèle étudié pour chaque maillage imposé, qu'après 80 itérations (**Figure V.1**).

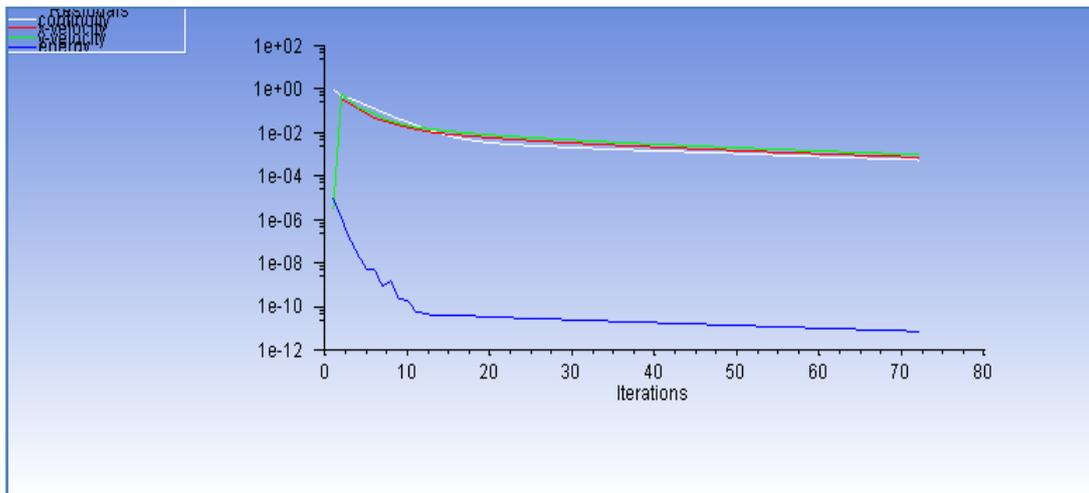


Figure V.1 : Présentation de l'évolution des résidus de calcul (Convergence de la solution).

V.3. Résultats et interprétation :

Dans le présent chapitre, nous avons réalisé une simulation numérique en utilisant la méthode du volume fini adaptée par le logiciel Ansys-workbench 17.1. est de présenter ces résultats sous forme des tableaux et leur interprétation en modifiant à chaque calcul, différentes dimensions du milieu poreux ainsi les paramètres de nano fluide hybride.

Dans cette simulation la perméabilité de milieu poreux varie en fonction du nombre adimensionnel de Darcy ($Da=10^{-3}$ et $Da=10^{-4}$) ; pour différentes valeurs de la porosité (0.65, 0.8 et 0.95) ; Alors que le nombre de Rayleigh varie de 10^3 à 10^5 , avec présence d'un nano fluide hybride de fraction volumique (0.01 à 0.035). La présentation de résultats concernant les champs de température et de la vitesse ainsi que le nombre de Nuselt moyen (Nu_{moy}).

V.4. Effet de la variation des différents paramètres sur la température et la vitesse :

On observe identiquement dans la **Figure V.2** et la **Figure V.3**, qu'avec l'augmentons le nombre de Rayleigh, la recirculation de l'écoulement à l'intérieur de la cavité évolue, intense (puisque les lignes de courant se joignent les uns des autres). On peut aussi comparer, que avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, les isothermes sont plus près l'une de l'autre dans la région porte des milieux poreux, c'est à dire la dimension de cette dernière. Implique que les gradients de température deviennent remarquables, c'est à dire que la dimension milieu poreux à travers la cavité provoque ralentissement de l'écoulement que donne un temps de porté de la chaleur d'un mode de conduction à un autre de la convection. On peut donc dire que les températures élevées sont celles du nano fluide hybride qu'écoulé à proximité du milieu poreux et que les températures les plus basses sont celles du fluide qui circule loin du milieu poreux.

V.5. Les champs de la température :

➤ $\varphi = 0.01$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.65$

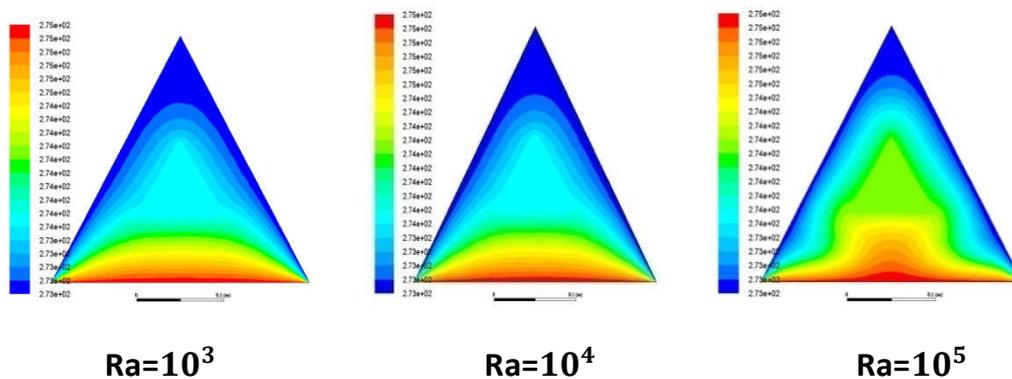


Figure V.2: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

V.6. Les champs de la vitesse :

➤ $\varphi = 0.01$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.65$

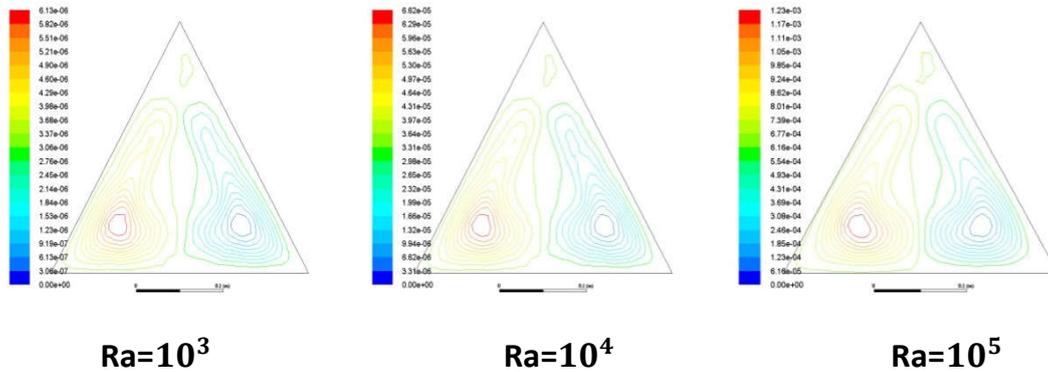


Figure V.3: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ **Remarque :** les autres résultats sont montrées à partir les annexes (A et B).

V.7. Effet de la fraction volumique sur le Nombre de Nusselt Moyen :

Les résultats moyen de Nusselt (Nu_{moy}), obtenus sont clairement illustrés sous formes des tableaux (Tableau V.2 jusqu'au Tableau V.19) :

Les résultats obtenus montrent que la présence du milieu poreux a un impacte remarquable sur l'échange thermique cela justifié, qu'une augmentation de nombre de Darcy (Da) provoque une augmentation du nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}).

On constate, aussi que l'augmentation du nombre adimensionnel de Rayleigh (Ra) approuve aussi une augmentation de du nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}) ; Cette augmentation est beaucoup plus prononcée pour la valeur élevée du nombre de Rayleigh ($Ra=10^5$).

On peut remarquer aussi que le nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}) augmente lorsque la fraction volumique solide de nano fluide hybride (φ) augmente, cette évolution est due à l'augmentation de la conductivité thermique.

✓ **Variation du Nombre de Nusselt moyen en fonction :**

1/ Cas : $Da=10^{-3}$ $\Phi=0.65$

Tableau V.2 : Effet de la fraction φ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^3$

φ	Nu_{moy}
0.01	62,042132
0.02	65,7373324
0.03	69,5882498
0.035	71,5751554

Tableau V.3 : Effet de la fraction φ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^4$

φ	Nu_{moy}
0.01	62,0689824
0.02	65,7600286
0.03	69,6184471
0.035	71,6061987

Tableau V.4 : Effet de la fraction φ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour un $Ra=10^5$

φ	Nu_{moy}
0.01	69,1896913
0.02	72,0161603
0.03	77,6041985
0.035	79,8197514

✓ **Effet de la fraction φ sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction :**

2/ Cas $Da=10^{-4}$ $\Phi=0.65$

Tableau V.5: Effet de la fraction φ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

φ	Nu_{moy}
0.01	62,0420704
0.02	65,7372928
0.03	69,5881782
0.035	71,5750992

Tableau V.6 : Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	62,0611222
0.02	65,7534236
0.03	69,6096015
0.035	71,597095

Tableau V.7: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	66,9150838
0.02	69,8758956
0.03	75,0532684
0.035	77,1960724

✓ **Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction :**

3/ Cas $Da=10^{-3}$ $\Phi=0.8$

Tableau V.8: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	62,0173912
0.02	65,7097423
0.03	69,557514
0.035	71,5426751

Tableau V.9: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	62,0445319
0.02	65,7326306
0.03	69,5880036
0.035	71,5741066

Tableau V.10: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	69,1855133
0.02	72,0162236
0.03	77,5993592
0.035	79,8147434

✓ Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction :

4/ Cas $Da=10^{-4}$ $\Phi = 0.8$

Tableau V.11: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	62,0173464
0.02	65,7096708
0.03	69,5574349
0.035	71,542645

Tableau V.12: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	62,0365538
0.02	65,7259704
0.03	69,5790242
0.035	71,5648781

Tableau V.13: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	66,9120216
0.02	69,8732084
0.03	75,0496146
0.035	77,1922885

✓ Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction :

5/ Cas $Da=10^{-3}$ $\Phi =0.95$

Tableau V.14: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	61,8722991
0.02	65,5490629
0.03	69,379991
0.035	71,3562957

Tableau V.15: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	61,901102
0.02	65,5734569
0.03	69,4125903
0.035	71,3898805

Tableau V.16: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	69,1783855
0.02	72,0113676
0.03	77,590916
0.035	79,8059551

✓ **Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction :**

6/ Cas $Da=10^{-4}$ $\Phi=0.95$

Tableau V.17: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^3$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	61,8722405
0.02	65,5489953
0.03	69,3799393
0.035	71,3562172

Tableau V.18: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^4$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	61,8925079
0.02	65,5662308
0.03	69,4028251
0.035	71,3798064

Tableau V.19: Effet de la fraction ϕ sur la variation du nombre de Nusselt moyen pour $Ra=10^5$

ϕ	Nu_{moy}
0.01	66,9046695
0.02	69,8537784
0.03	75,0405037
0.035	77,1826424

V.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous allons interpréter et discuter les résultats qu'on a obtenus d'après la simulation numérique ; où nous avons trouvé que les dimensions de milieu poreux et la fraction volumique solide de nano fluide hybride ont un impact remarquable sur le transfert thermique.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le présent mémoire est une étude numérique consistant à étudier l'impact des dimensions des milieux poreux sur l'échange thermique en présence de nano fluide hybride ($AL_2O_3+Cu-H_2O$).

Cette étude a été achevée par un outil de la simulation numérique **Ansys-Workbench 17.1** où on a présenté les lignes isothermes et de courant en fonction de dimensions de milieu poreux et à différentes valeurs de nombre de Rayleigh et fractions volumiques de nano fluide hybride.

Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les remarques suivantes :

1- une augmentation de nombre de Darcy (Da) et une diminution de la porosité (Φ) provoque une amélioration remarquable de l'échange thermique.

2- l'augmentation de nombre de Rayleigh (Ra) généré un transfert thermique important transfert justifié en fonction des tableaux par un coefficient d'échange plus élevé.

3-la conductivité thermique du nano fluide hybride augmente avec l'augmentation de la fraction des nanoparticules dans le fluide volumique ce qui est permet d'augmenter les performances thermiques.

D'une manière générale la présence de milieu poreux et les nano fluides hybrides donne une bonne estimation et favorise d'améliorer le transfert de chaleur.

Bibliographie

- [1] DAHMANI Yanis, DALI Adel, Influence de la variation des propriétés du nanofluide sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non-Darcéen, UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2021.
- [2] SALHI MASSINISSA et MAMMERI LAMIA, Etude d'un écoulement convectif d'un nanofluide à travers un milieu poreux non Darcéen, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2019.
- [3] MESSAOUDI Djilali, HERR Sabrina, Contribution à l'étude de la convection naturelle conjuguée en milieu poreux, Université Kasdi Merbah –Ouargla, 2015.
- [4] Hamza Chérif Sadouk. Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois. Autre [cond-mat.other]. Université Paris-Est, 2009. Français. NNT : 2009PEST1001.tel-00499251.
- [5] BENMERKHI MERIEM, transfert de chaleur et matière dans un canal rempli Partiellement d'une matière poreuse, Thème MAGISTER en PHYSIQUE, Université Mentouri Constantine, 2011.
- [6] BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir, Convection naturelle lors du refroidissement d'un composant électronique enveloppé par une couche poreuse, Thème Master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019.
- [7] SASSANE Nadjette, Modélisation du transfert de chaleur lors de l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'une paroi poreuse, Thème MAGISTER en PHYSIQUE, Université 20 Août 55, Skikda, 2008.
- [8] CHARLES VILLEMURE, optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques d'un stratifié poreux soumis à un flux thermique en convection naturelle, Université Laval Québec, 2007.
- [9] BOULECHFAR Hichem, Simulation numérique des transferts de chaleur et de masse en milieux poreux saturés de fluide dans différents espaces annulaires, Thème DOCORAT en PHYSIQUE ENERGETIQUE, Université Des Frères Mentouri Constantine 1, 2016.
- [10] G. Degan, S. Zohoun, P. Vasseur, Forced convection in horizontal porous channels with hydrodynamic anisotropy, Int. J. Heat Mass Transfer 45, pp. 3181–3188, 2002.
- [11] Bachir Gladés , Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard, thèse doctorat (2010), Université Toulouse III- Paul Sabatier ,2010.
- [12] Salma Halelfadl. Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone. Génie mécanique [physics.class-ph]. INSA de Rennes, 2014. Français.NNT : 2014ISAR0008. tel-01127363.

- [13] Salhi Hichem, Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes Nanofluide, Thème DOCTORAT en MECANIQUE, UNIVERSITE DE BATNA, 2015.
- [14] Ho, C.J., Chen, M.W., Li, Z.W., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 4506–4516, 2008
- [15] Islam ZID, L'intensification des échanges thermiques dans les échangeurs de chaleur par nano fluides 'Application à un échangeur double enveloppes', Université Mohamed Khider – Biskra, 2020.
- [16] FAID Hanane et CHERIEF Kalthoum, Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée remplie de nano-fluide, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2020.
- [17] E. BELAHMADI, R. BESSAÏH, Etude numérique de la convection mixte dans un canal vertical rempli d'un nanofluide, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2016.
- [18] EL KHAOUDI FATIMA, GUERAOUI KAMAL, MAN-LAYAKHAF SAMIR, La convection naturelle des nanofluides en cavité rectangulaire verticale, Équipe de modélisation en mécanique des fluides et environnement, LPT, Faculté des Sciences Rabat-Agdal, B.P. 1014, Rabat, Maroc. Département de Génie Mécanique, Université d'Ottawa, Ottawa, Canada, K1N 6N5, 2015.
- [19] Mahdi Benzema, Youb Benkahla, Ahlam Boudiaf, Seif-Eddine Ouyahia. Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (AgMgO/Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique. CFM 2017 - 23ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2017, Lille, France. hal-03465684, 2017.
- [20] E. EBRAHIMNIA-BAJESTAN, A. JAVADIAN-SARAF, H. NIAZMAND, P. ESTELLÉ, Caractéristiques hydrodynamiques et transfert de chaleur par convection de nanofluides, University of Advanced Technology, Kerman, Iran, 2015.
- [21] Hamadi hamza et Nassou Mourad, Étude d'un écoulement convectif le long d'une surface inclinée immergée dans un milieu poreux rempli d'un nanofluide, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2020.
- [22] I. FERSADOU, H. KAHALERRAS, Convection forcée d'un nanofluide dans un canal rempli d'un milieu poreux anisotrope, USTHB/FGMGP/LTPMP, BP 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger-Algérie, 2016.
- [23] Cimpean D.S., Sheremet M. A. et Pop I. (2020), Mixed Convection of Hybrid Nanofluid In a Porous Trapezoidal Chamber, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 116: 104627.
- [24] Raza, J., Rohni, A., M., Omar, Z. (2016) : MHD flow and heat transfer of Cu–water nanofluid in a semi porous channel with stretching walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 103, pp. 336 – 340.

- [25] M. Mustapha Bordjane, Mode de transfert thermique (cours et exercices), Université des Sciences et de la Technologie d'Oran «Mohamed Boudiaf», 2017.
- [26] Makhloufi Med Amine Ammar ; Simulation numérique de la convection naturelle bidiffusive dans une cavité poreuse. Mémoire master (2018) Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi.
- [27] João-Paulo RIBEIRO et Jean-Antoine GRÜSS, Nanofluides pour les applications thermiques, www.techniques-ingenieur.fr, (10 juillet 2009).
- [28] Souad BADACHE, Cours échauffement et refroidissement des actionneurs électromécaniques Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf – USTOMB, 2020/2021.
- [29] Donald A. Nield and Adrian Bejan, Convection in Porous Media Third Edition.
- [30] Esam DANA, Contribution à la caractérisation des écoulements biphasiques dans les matériaux poreux étude expérimentale sur trois grès, Thèse doctorat Université Lille-1, 1999.
- [31] Alexandre Delache. Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux: comparaison avec l'expérience.. Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2005. Français. tel-00069550.
- [32] Jean-François Daïan. Equilibre et transferts en milieux poreux. 2013. hal-00452876v5.
- [33] Régis Turuban. Etudes numérique et expérimentales du mélange en milieux poreux 2D et 3D. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Rennes 1, 2017. Français. NNT : 2017REN1S051. tel-01686457.
- [34] Bafétigué Ouattara. Prise en compte des caractéristiques thermophysiques des parois dans le processus de séparation des constituants d'un mélange binaire ou d'un nanofluide par diffusion thermogravitationnelle en milieu poreux. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2012. Français. tel-00968643.
- [35] Franck Lominé. Ecoulements de particules dans un milieu poreux. Analyse de données, Statistiques et Probabilités [physics.data-an]. Université Rennes 1, 2007. Français. tel-00198209
- [36] Vincent Le Maout, Modélisation d'écoulements multiphasiques de fluides viscoélastiques en milieux poreux, Thèse Doctorat, École Doctorale de Sciences physiques et de l'ingénieur, L'université De Bordeaux, 2020.
- [37] http://www.planete-tp.com › loi_darcy_cle08a118
- [38] Houssein Nasser El Dine. Étude mathématique et numérique pour le modèle Darcy-Brinkman pour les écoulements diphasiques en milieu poreux. Analyse numérique [math.NA]. École centrale de Nantes; Université Libanaise. Faculté des Sciences (Beyrouth, Liban), 2017. Français. NNT : 2017ECDN0022. tel-01626032v3.

- [39] Jean-Paul Caltagirone. De la mécanique discrète à la loi de Darcy-Forchheimer. 2018. hal-01762952
- [40] Wolfgang Ehlers, Darcy, Forchheimer, Brinkman and Richards: classical hydromechanical equations and their significance in the light of the TPM, 2020.
- [41] BOUHEZZA Aicha, BOUBEGGAR Saousene, BOUKERMA Karima, Simulation numérique du transfert de chaleur de nanofluide dans un canal, Département de Technologie, Faculté de Technologie, Université 20 Août 1955 Skikda, 2016.
- [42] Ridha MEBROUK, Etude paramétrique des échanges convectifs turbulents dans les configurations d'intérêt pratique, Université Des Frères Mentouri Constantine 1, 2017.
- [43] Abdellah Hadaoui. Effets de taille et de concentration sur les propriétés thermiques et rhéologiques des nanofluides. Autre. Université d'Orléans; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), 2010. Français.NNT : 2010ORLE2086. tel-00769934.
- [44] SIDI EL BEKAYE MAIGA, Etude numérique du transfert thermique des 'nanofluides' dans un tuyau au chauffé uniformément à la paroi, Université De Moncton , 2014.
- [45] BELDJANI Charafeddine, Amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'usage de la nanotechnologie, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [46] Alexandre Briclot. Évaluation de la performance énergétique des échangeurs par nanofluides caloporteurs. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2021. Français. fftel-03584714f.
- [47] Jean-Antoine Gruss, Olivier Doche, Olivier Soriano. Une nouvelle technologie pour les échanges thermiques : le Nanofluide. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360456
- [48] S. LAHLOU, M. ZAYDAN et R.SHAQUI, Détermination des propriétés thermophysiques et la comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques pour différents nanofluides, Université Hassan II de Casablanca, 2017.
- [49] CHADI Kamel, Modélisation et simulation du refroidissement des éléments à base de composants électroniques par des nanofluides, Thèse DOCTORAT en MECANIQUE ENERGETIQUE, Université Mohamed Khider –Biskra.
- [50] LAMOURI Azzeddine, Étude hydrodynamique et thermique d'un échangeur de chaleur contenant d'un milieu poreux, cas d'étude PV/T hybride, Université de Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [51] Mohamed AKSOUH. Amina MATAOUI, Travaux pratiques mécanique des fluides numériques (CFD), Laboratoire de Mécanique des Fluides Théorique et Appliquée-LMFTA Département Énergétique et Mécanique des Fluides Faculté de Physique- USTHB.
- [52] MADAOUI Lamine, MESSAOUDI Mohammed, Etude numérique de transfert de chaleur d'un écoulement de fluide dans un canal cylindrique, Université De Kasdi Merbah, 2019.

Annexe A : Les champs de la température

➤ $\varphi = 0.01$

• $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.65$

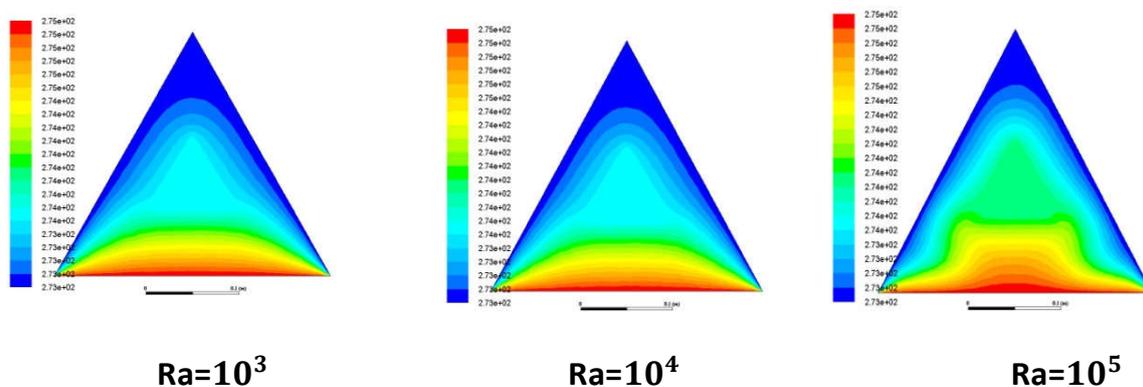


Figure A.1 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

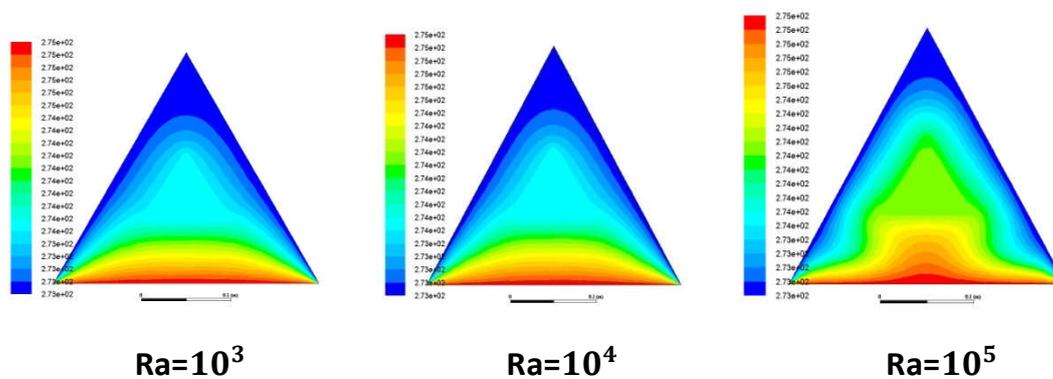


Figure A.2 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.8$

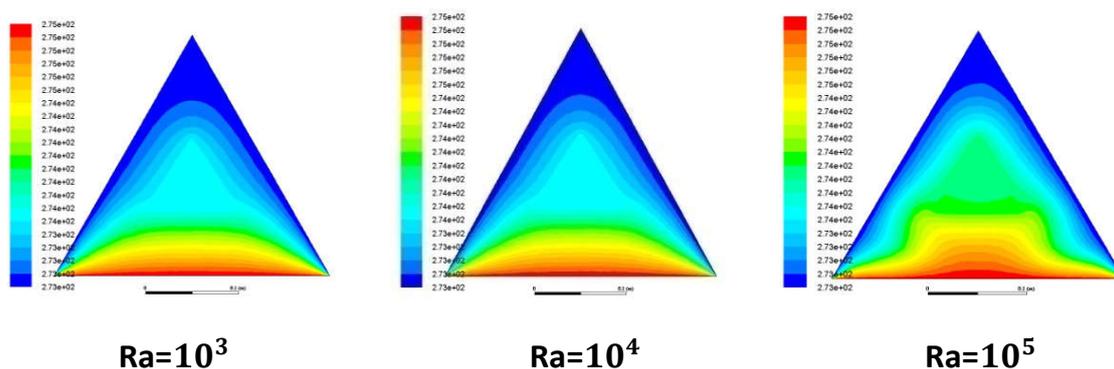


Figure A.3: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

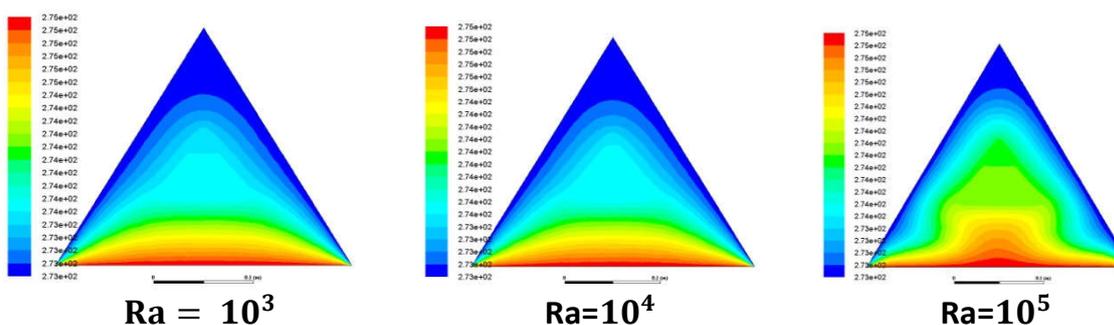


Figure A.4 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.95$

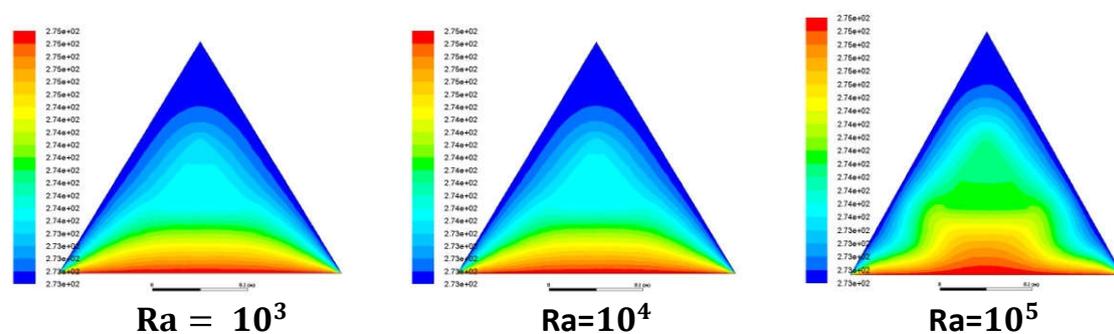


Figure A.5 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.01$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ $\varphi = 0.02$:

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.65$

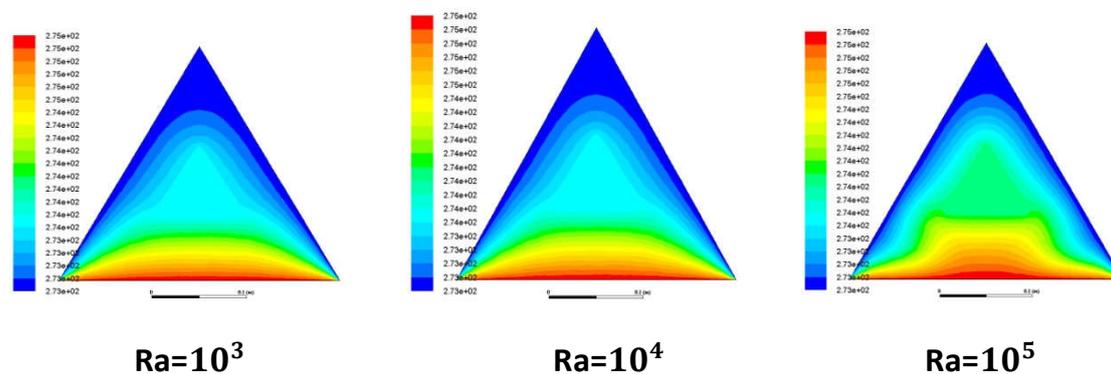


Figure A.6 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.65$

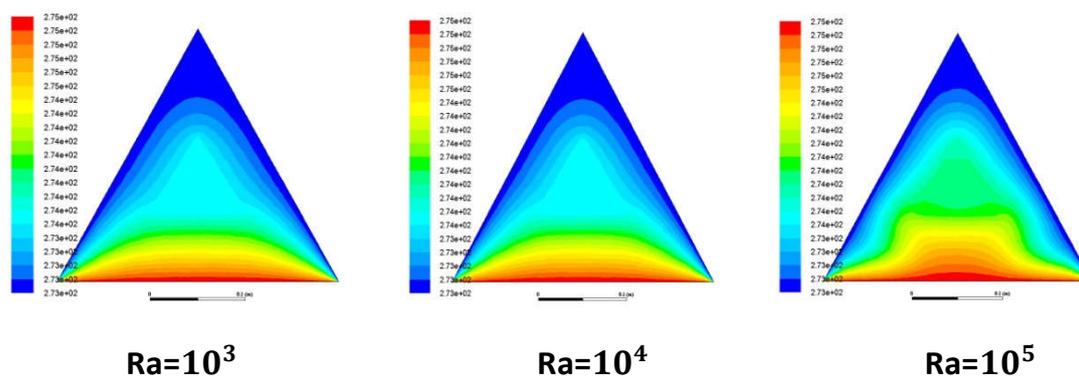


Figure A.7: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3} \Phi = 0.8$

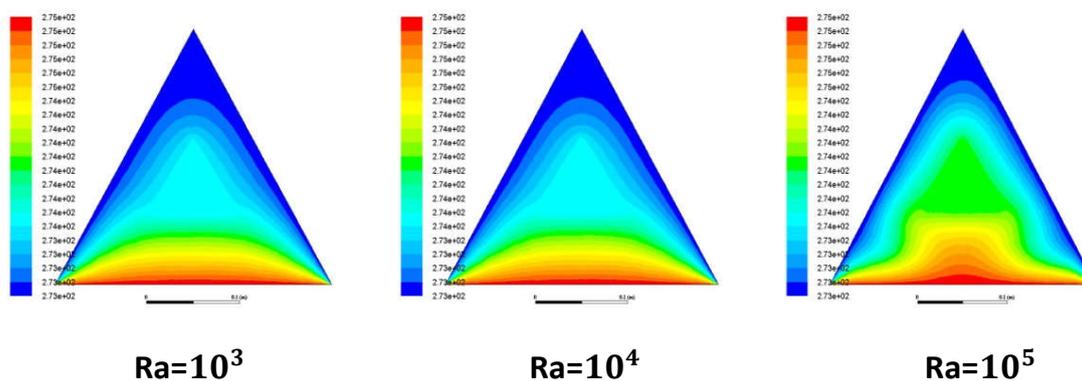


Figure A.8 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4} \Phi = 0.8$

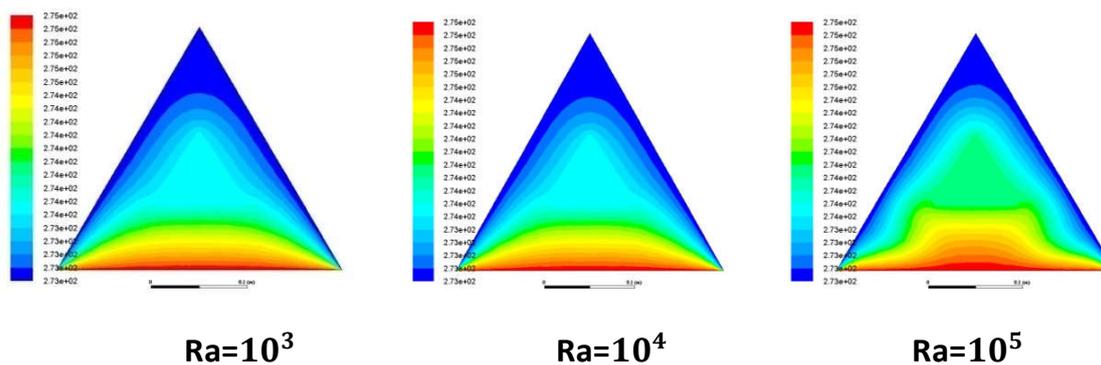


Figure A.9 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3} \Phi = 0.95$

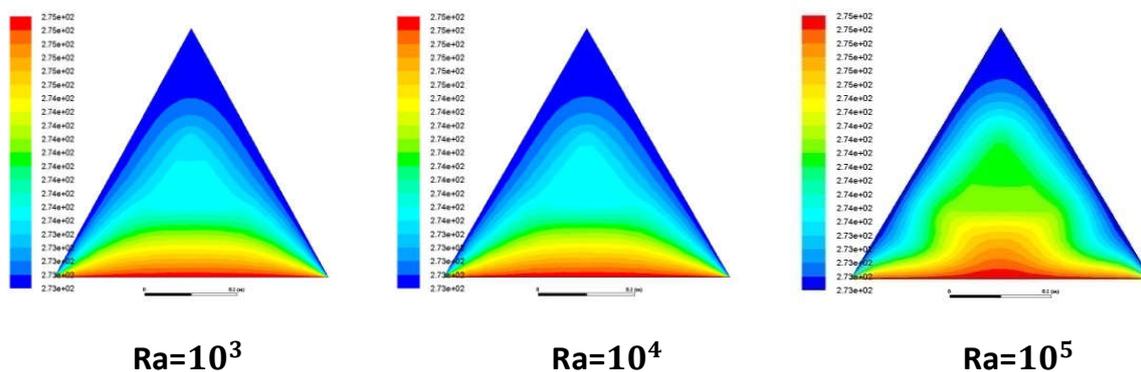


Figure A.10: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4} \Phi = 0.95$

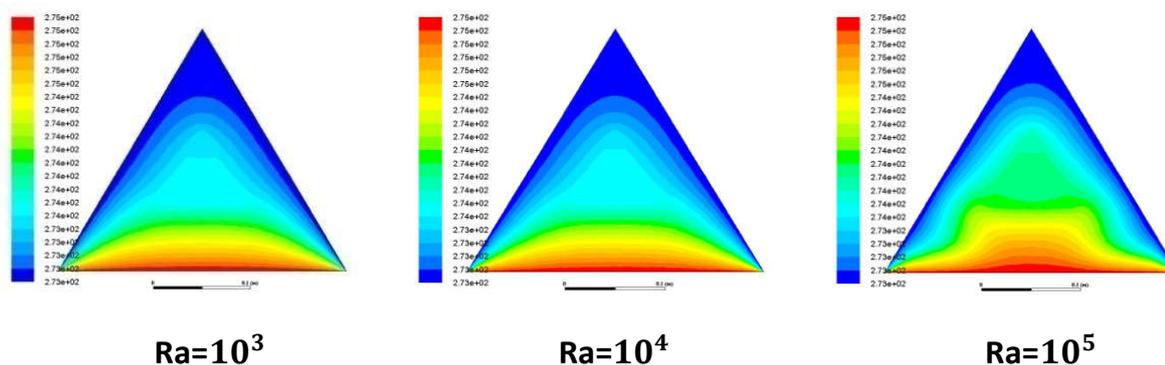


Figure A.11: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.02$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ $\varphi = 0.03$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.65$

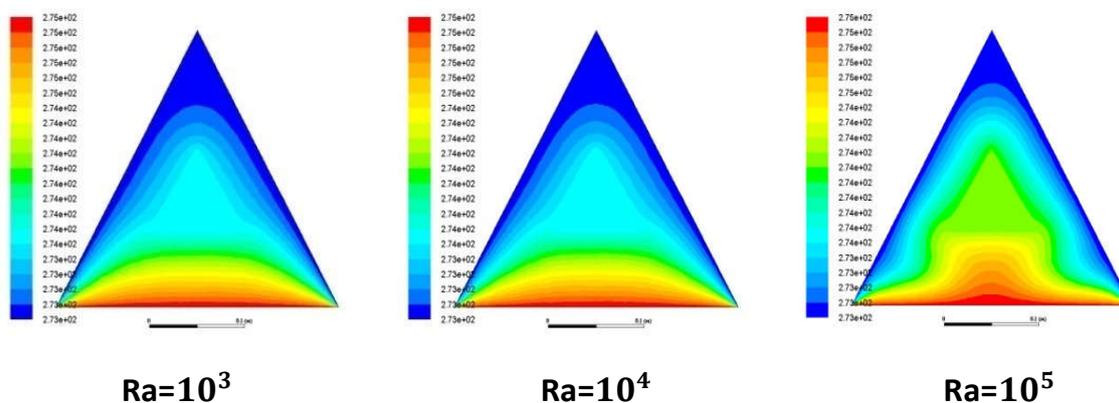


Figure A.12 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.65$

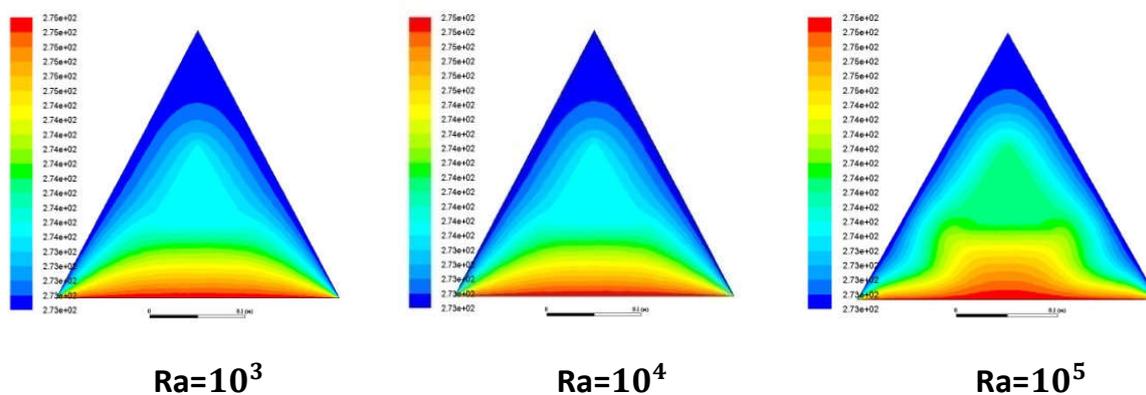


Figure A.13 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

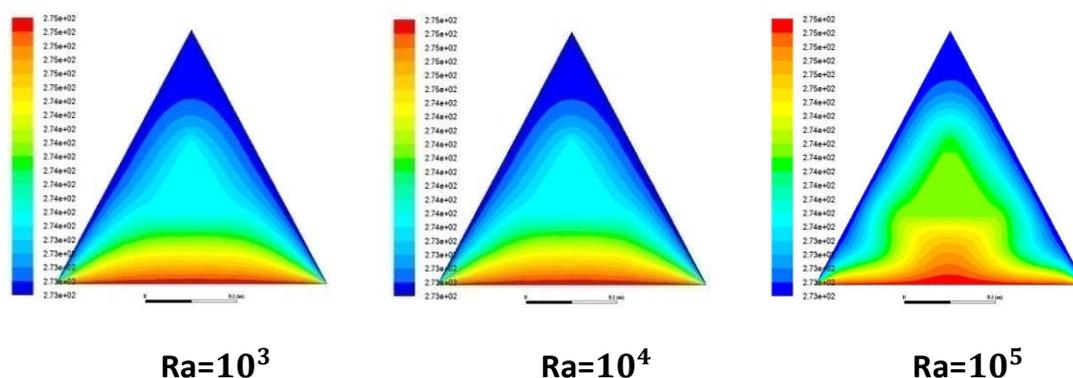


Figure A.14: Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\varphi=0.8$

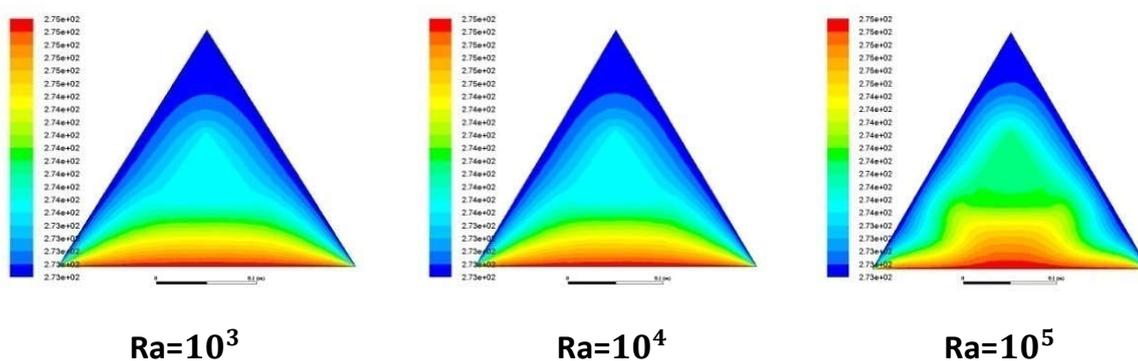


Figure A.15 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

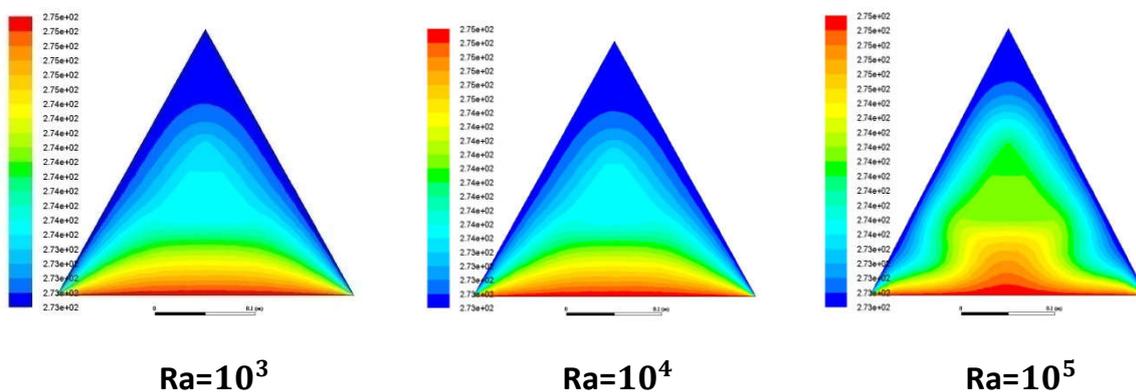


Figure A.16 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.95$

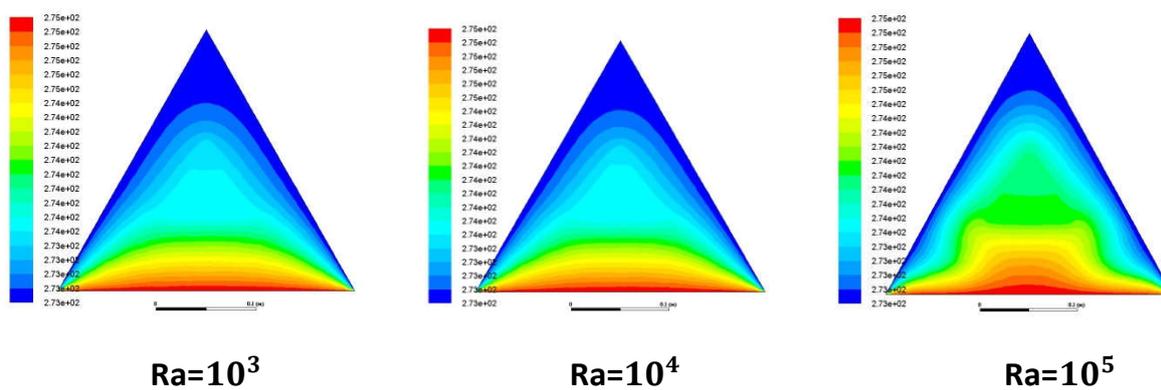


Figure A.17 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.03$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ $\varphi = 0.035$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.65$

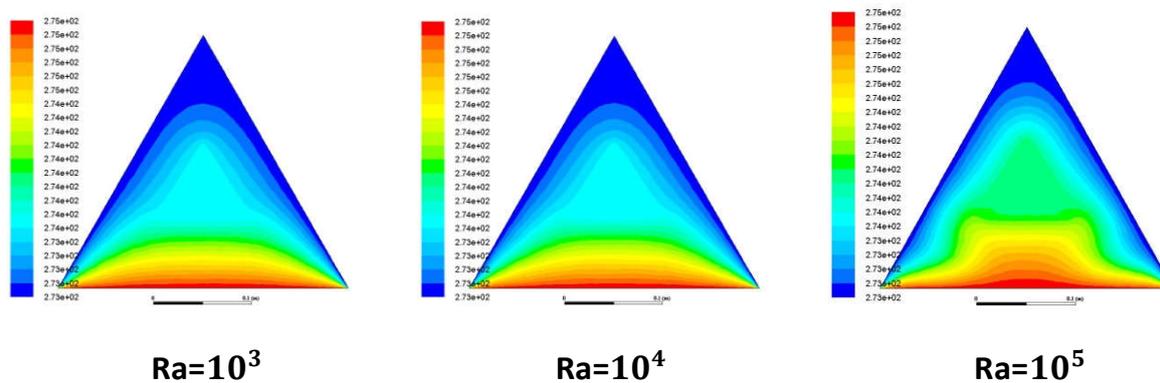


Figure A.18 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

• $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.65$

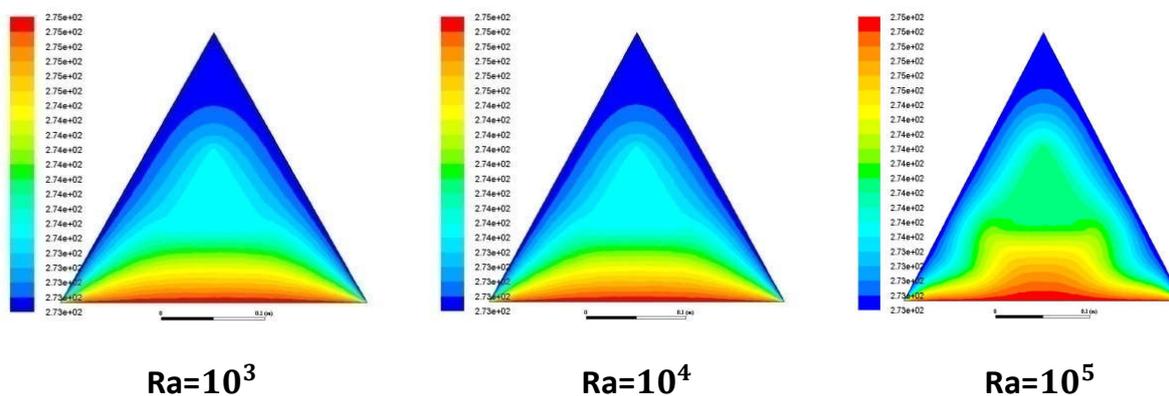


Figure A.19 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

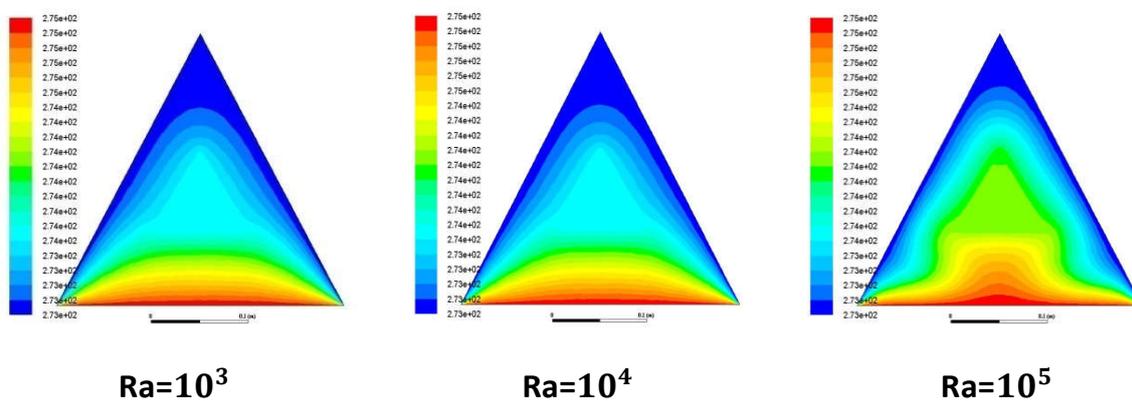


Figure A.20 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.8$

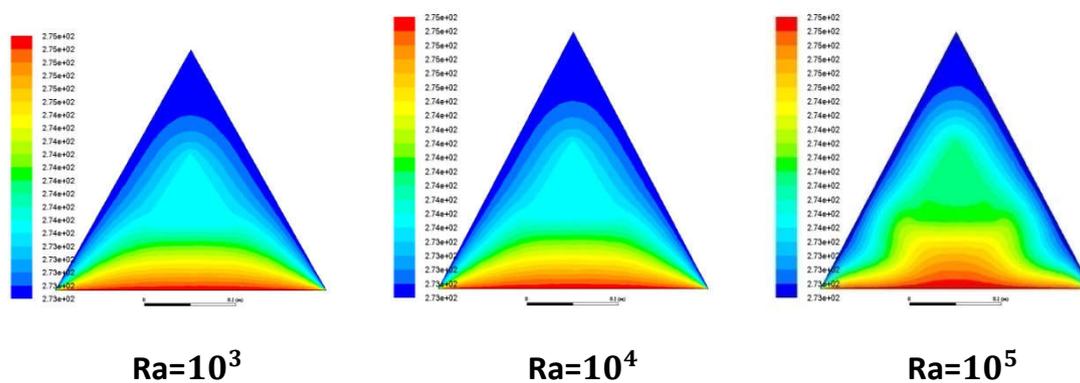


Figure A.21 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

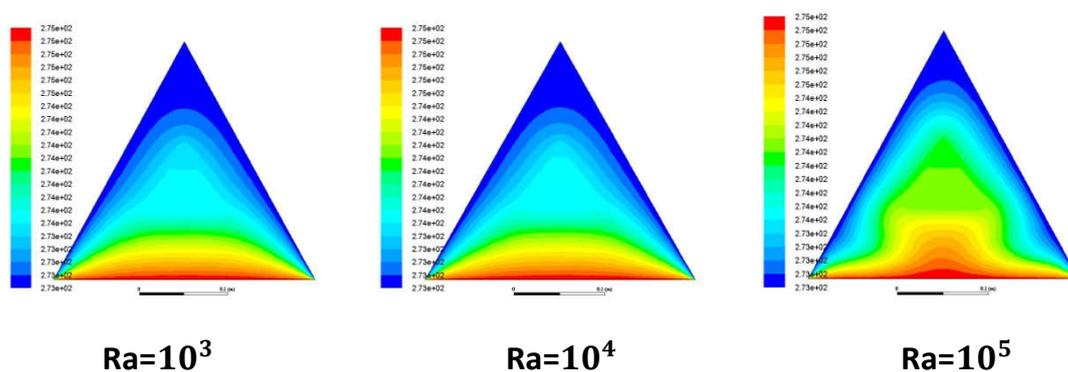


Figure A.22 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.95$

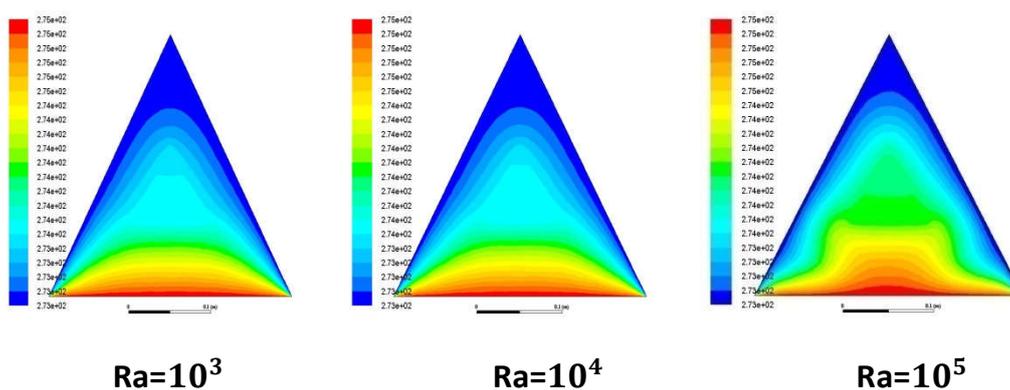


Figure A.23 : Contours des isothermes pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$, $\varphi = 0.035$ et pour différentes valeurs de $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Annexe B : les champs de la vitesse

➤ $\varphi = 0.01$

• $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.65$

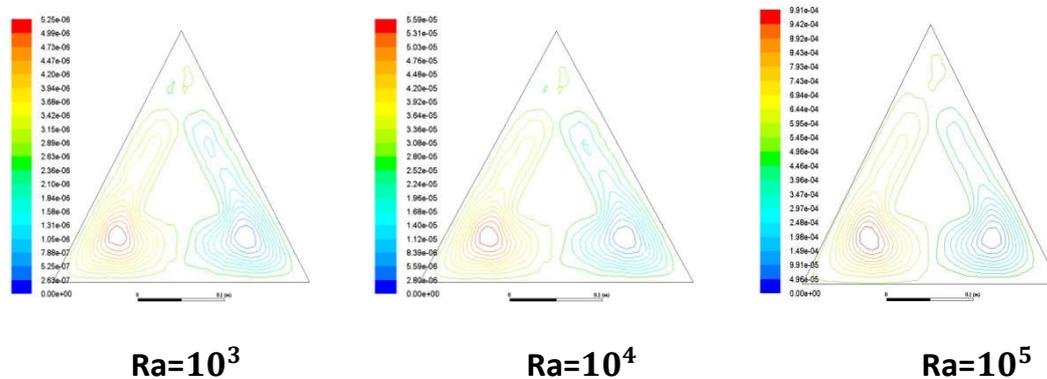


Figure B.1: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

• $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

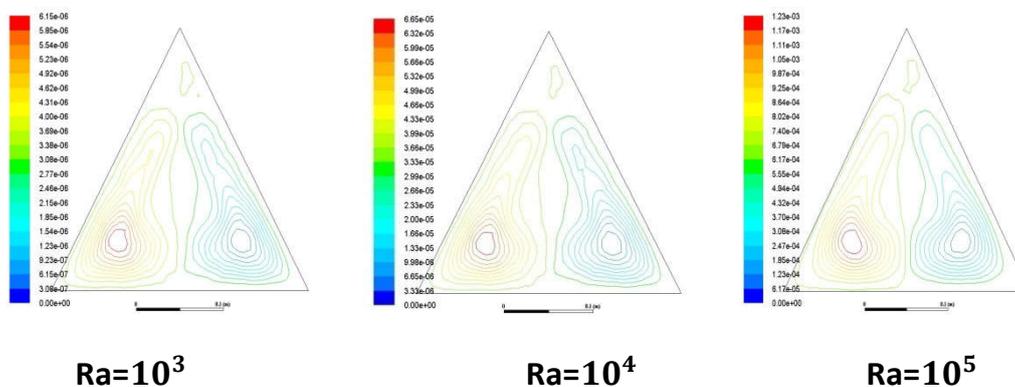


Figure B.2: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.8$

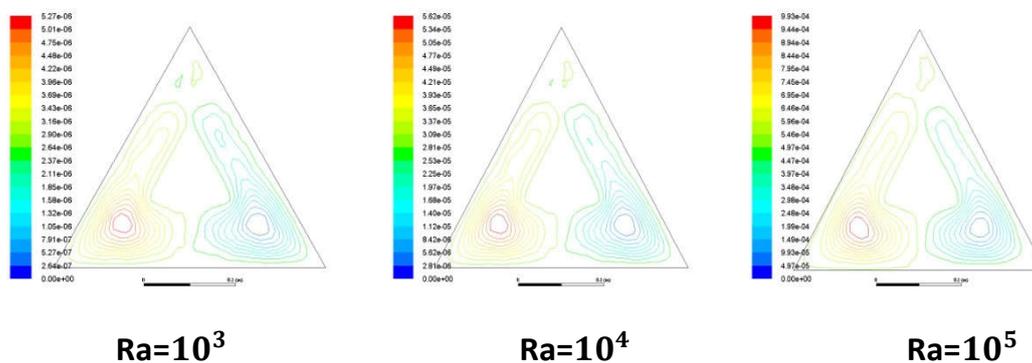


Figure B.3: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

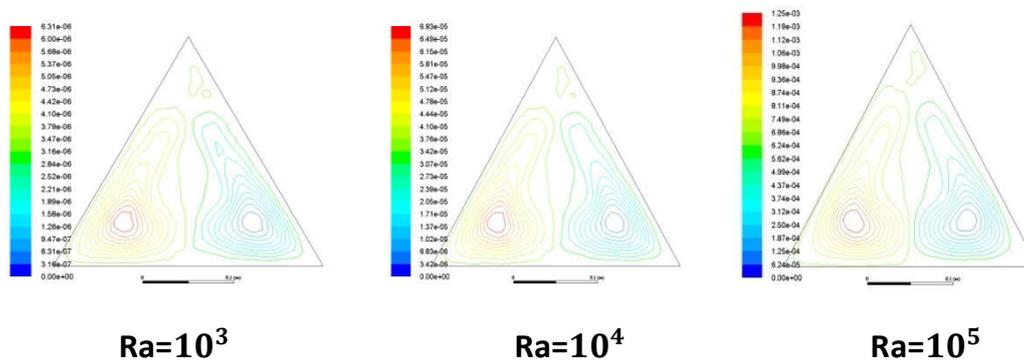


Figure B.4: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.95$

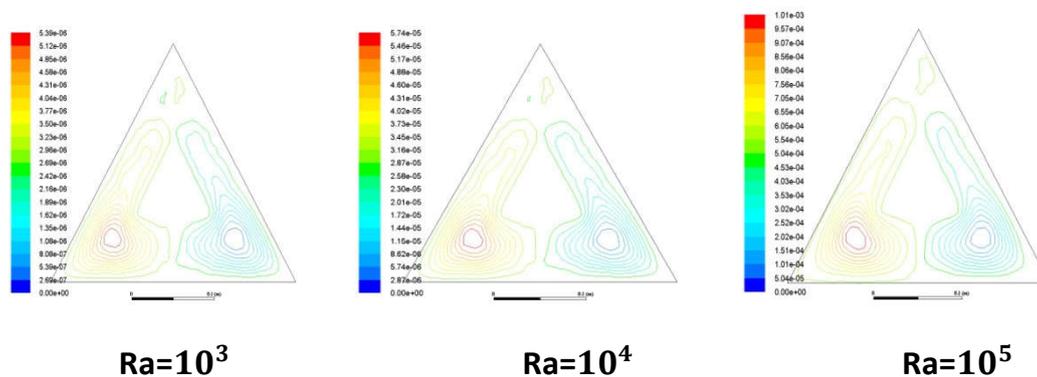


Figure B.5: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.01$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

➤ $\varphi = 0.02$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.65$

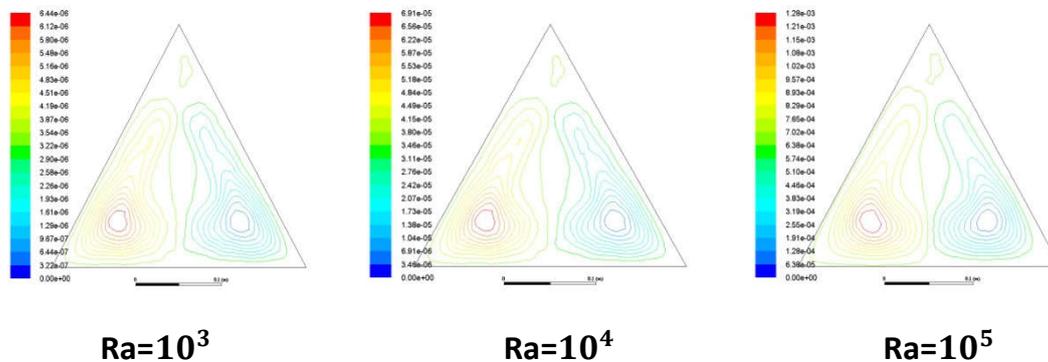


Figure B.6: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.65$

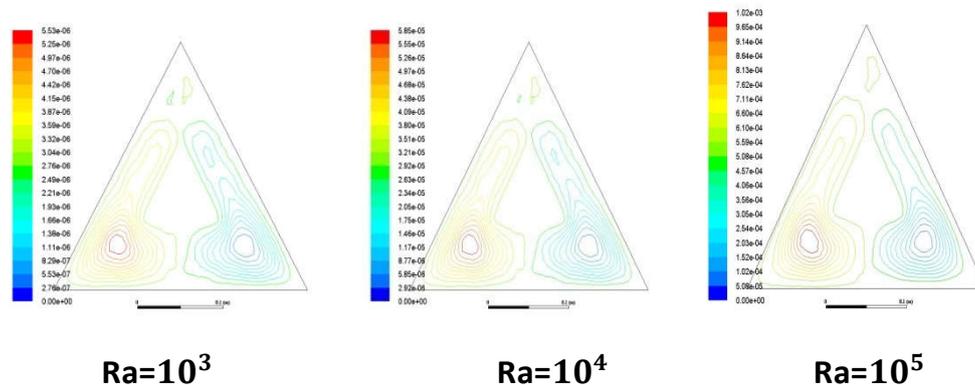


Figure B.7: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

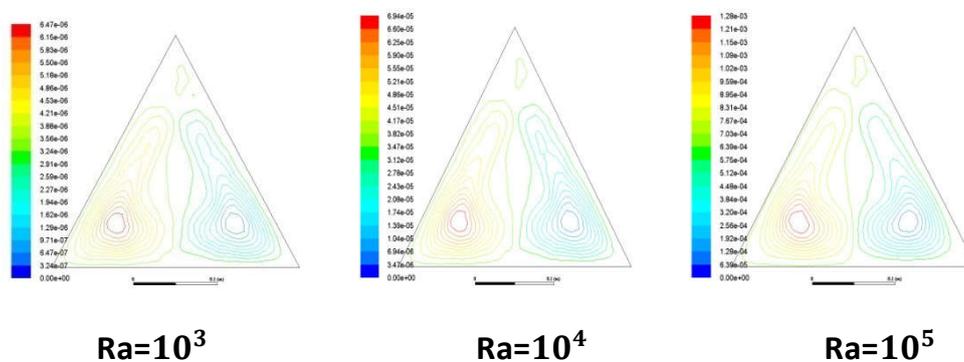


Figure B.8: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.8$

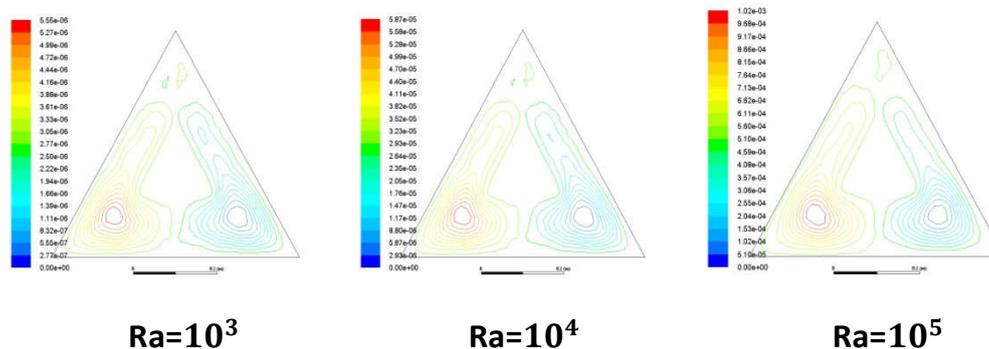


Figure B.9: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

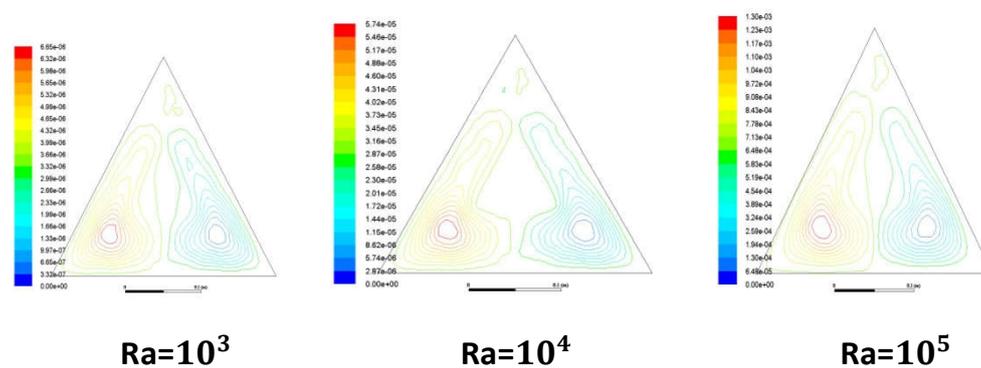


Figure B.10: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.95$

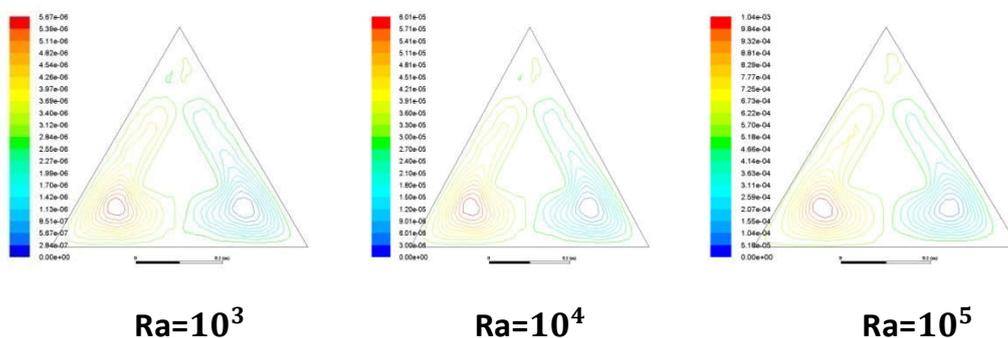


Figure B.11: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.02$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $\varphi = 0.03$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.65$

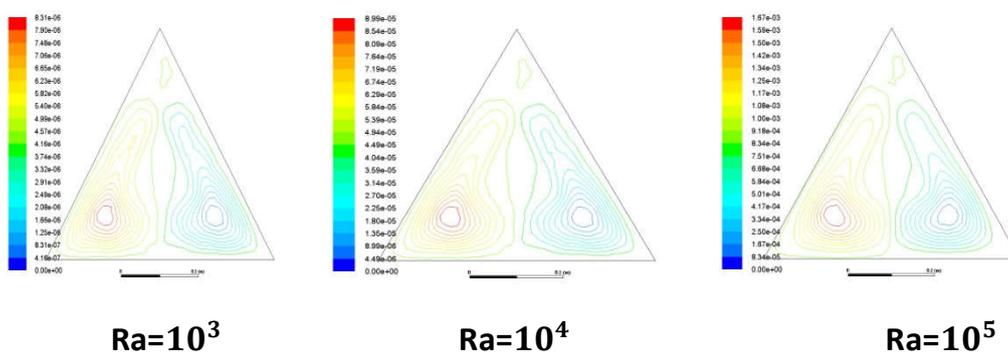


Figure B.12: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.65$

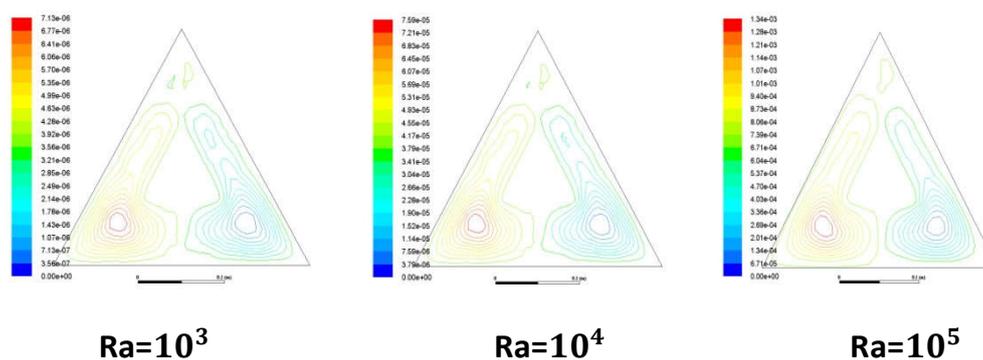


Figure B.13: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.8$

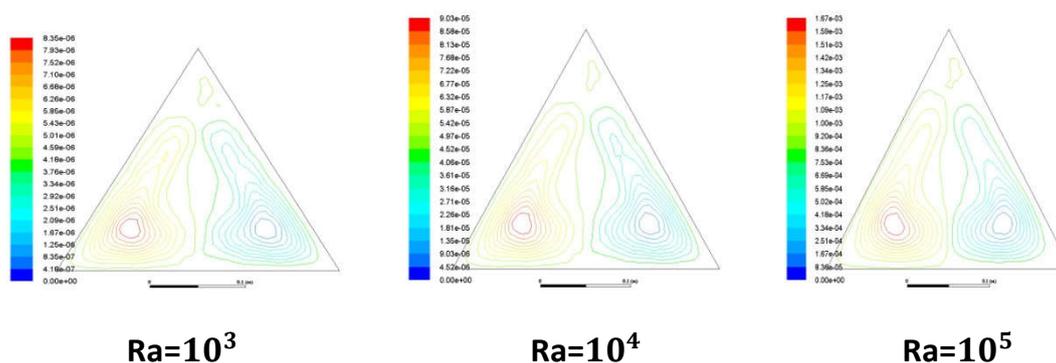


Figure B.14: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi=0.8$

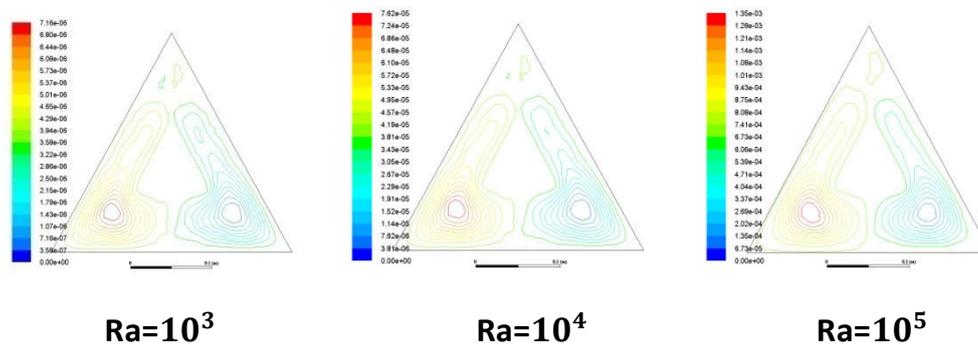


Figure B.15: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi=0.95$

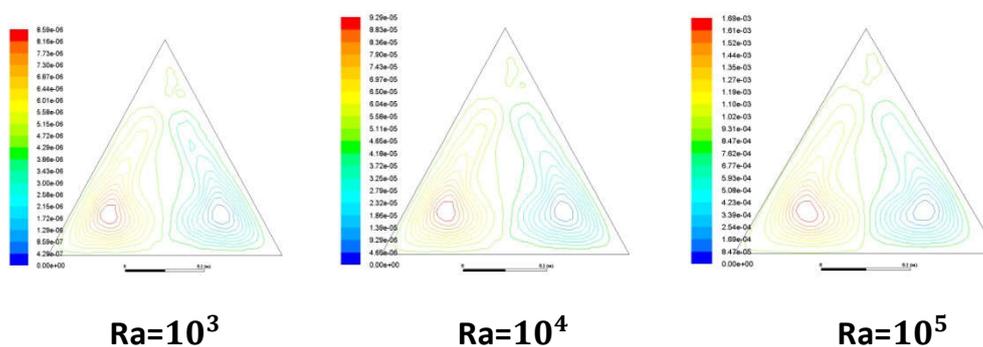


Figure B.16: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.95$

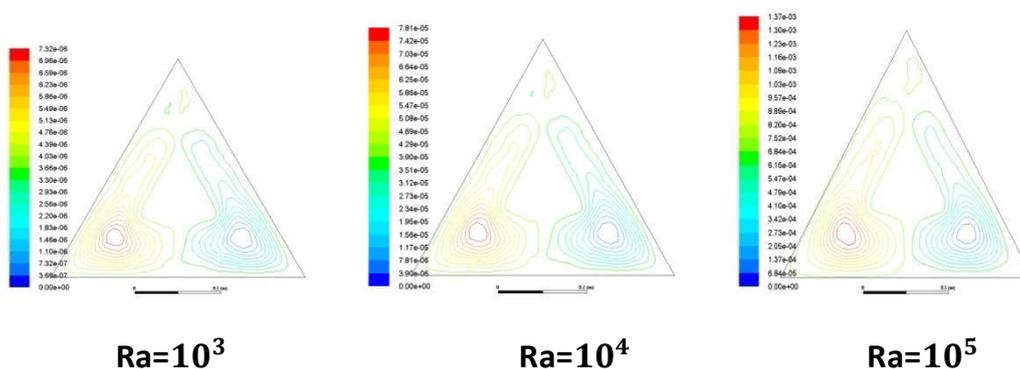


Figure B.17: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.03$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$

- $\varphi = 0.035$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.65$

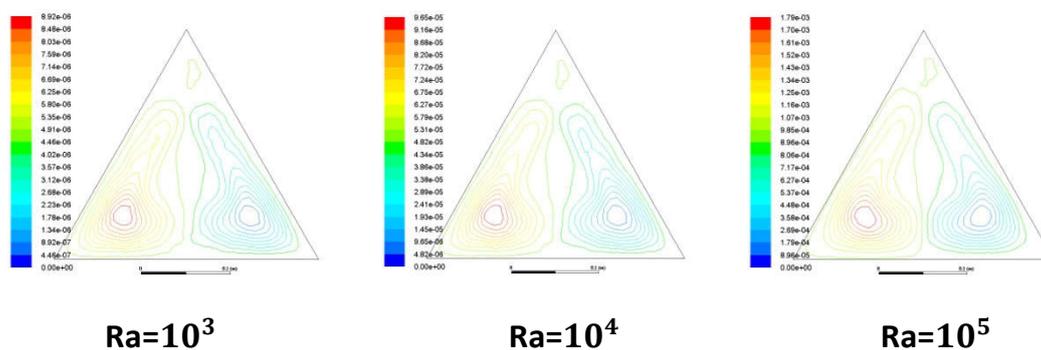


Figure B.18: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.65$

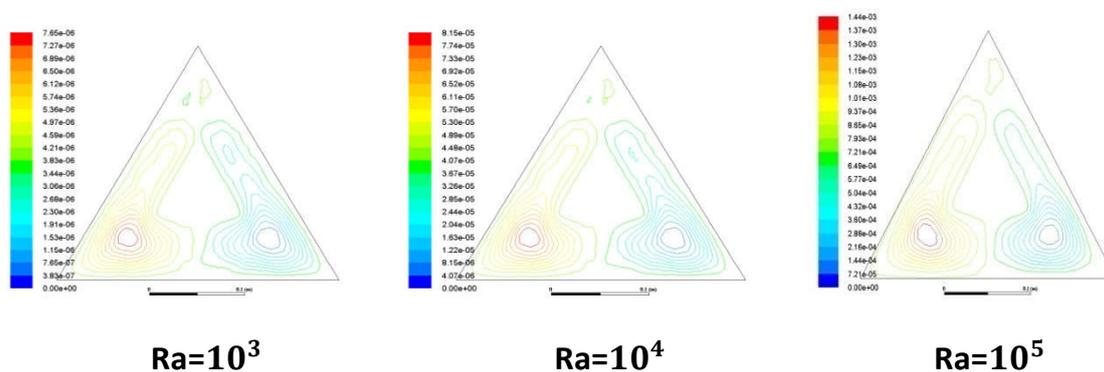


Figure B.19: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.65$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.8$

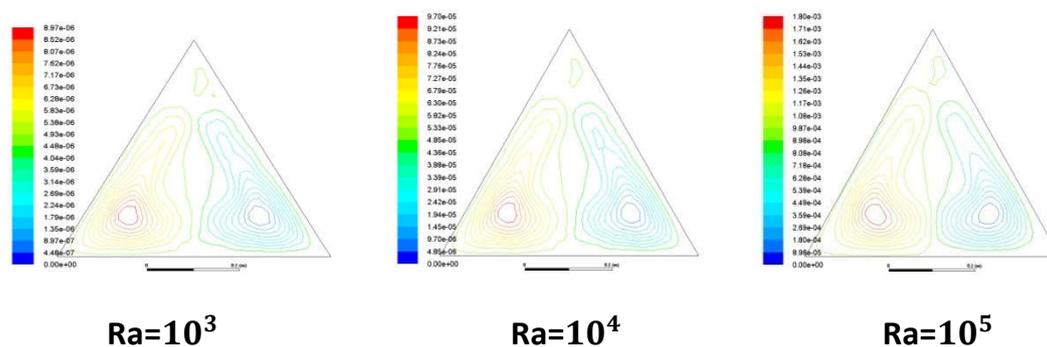


Figure B.20: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.8$

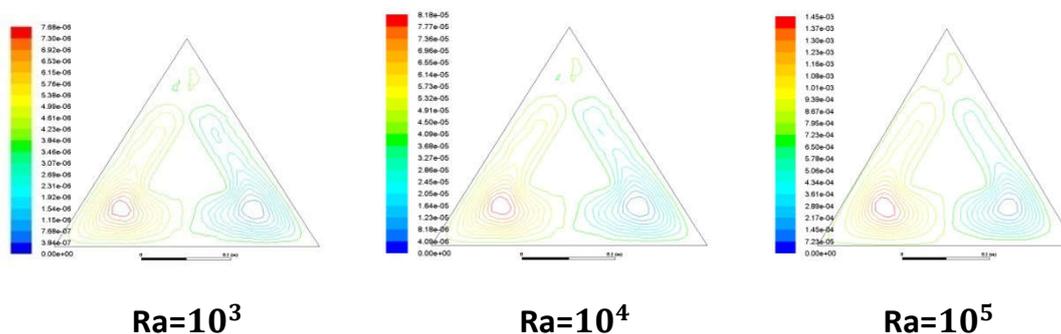


Figure B.21: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.8$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-3}$ $\Phi = 0.95$

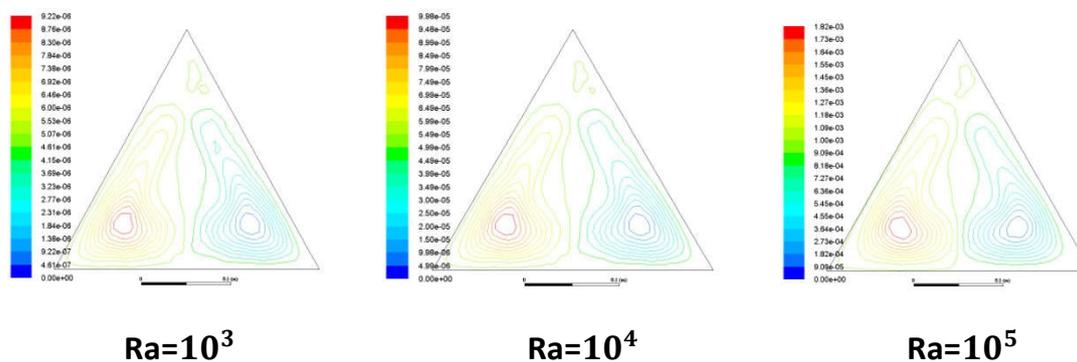


Figure B.22: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-3}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

- $Da = 10^{-4}$ $\Phi = 0.95$

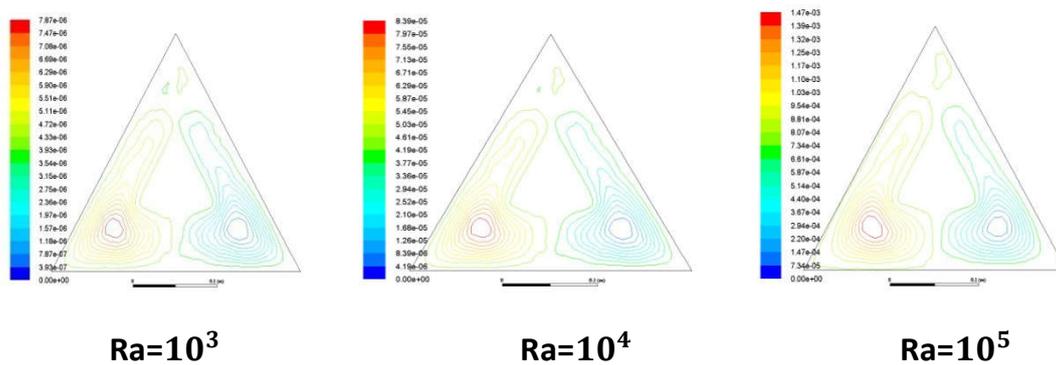


Figure B.23: Contours des champs de la vitesse pour $Da = 10^{-4}$, $\Phi = 0.95$ et $\varphi = 0.035$ pour différentes valeurs de Rayleigh $Ra=10^3$, $Ra=10^4$, $Ra=10^5$

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité triangulaire bidimensionnelle remplie d'un nano fluide hybride ($AL_2O_3+Cu-H_2O$) en présence d'un milieu poreux. Les équations gouvernantes du phénomène physique ont été résolues par la méthode des volumes finis, et l'effet du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique des nanoparticules a été étudié sur les valeurs de débit et d'échange de chaleur. Selon les résultats obtenus à partir de l'étude, il a été noté l'effet de l'augmentation du nombre de Rayleigh sur le coefficient de transfert de chaleur, et la relation inverse entre la porosité du milieu et le transfert de chaleur, c'est-à-dire plus la valeur de la porosité du milieu est faible, plus le transfert de chaleur est important. Par contre, l'indice de Nusselt est affecté par l'augmentation de l'indice de Rayleigh et la diminution de la valeur de porosité du milieu.

Mots Clés :

Le transfert de chaleur, Milieu poreux, la convection libre, Nano fluide, Nano fluide hybride, ansys-workbench.

Abstract

The aim of this work is to study the effect of natural convection inside a two-dimensional triangle cavity filled with a hybrid nanofluid ($AL_2O_3+Cu-H_2O$) in the presence of a porous medium. The governing equations of the physical phenomenon were solved by the finite volume method, and the effect of Rayleigh number and volume fraction of nanoparticles was studied on flow and heat exchange values. According to the results obtained from the study, it was noted the effect of increasing the Rayleigh number on the heat transfer coefficient, and the inverse relationship between the porosity of the medium and the heat transfer, that is, the lower the value of the porosity of the medium, the greater the heat transfer. On the other hand, the Nusselt number was affected by the increase in the Rayleigh number and the decrease in the porosity value of the medium.

Keywords:

Heat transfer, Porous medium, free convection, Nano fluid, Hybrid nano fluid, ansys-workbench

ملخص

الهدف من هذا العمل دراسة تأثير الحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف مثلث ثنائي الأبعاد تم مملوءة بالسائل النانوي الهجين ($AL_2O_3+Cu-H_2O$) بوجود وسط مسامي .حيث تم حل المعادلات الحاكمة للظاهرة الفيزيائية بطريقة الحجوم المنتهية ، وتمت دراسة تأثير كل من عدد راييلي وحجم الجسيمات النانوية وعدد دراسي على قيم التدفق والتبادل الحراري. من النتائج المتحصل عليها من الدراسة تم ملاحظة تأثير زيادة عدد راييلي على معامل انتقال الحرارة ،والعلاقة العكسية بين مسامية الوسط والنقل الحراري ، أي كلما قلة قيمة مسامية الوسط زاد النقل الحراري. من ناحية أخرى تأثر عدد نسلت بالزيادة في عدد راييلي ونقصان قيمة مسامية الوسط .

الكلمات المفتاحية

نقل الحرارة ، وسط مسامي ،الحمل الحراري الطبيعي،سائل نانو ، سائل نانو هجين