REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université YAHIA Fares De Médéa

Faculté de Technologie

Département de Génie des procédés et de l'Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour obtenir le Diplôme de Master en Génie des Procédés

Option : Génie chimique

THEME

Etude de Transfert de Chaleur et Masse dans Une Cavité Poreuse Saturée Par Nanofluide

Présenté Par :

Ferdi Nesrine

Moussa Nour El houda

Promoteur :

Dr N. Hadidi

Dr R. Rebhi

Année Universitaire 2019 -2020


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et

De me soutenir, à ceux qui leur amour m'a

Donné la volonté d'aller toujours de l'avant,

A mes très chers parents,

Que dieu les protèges.

A ma chère sœur et son mari Ali

A mon très cher frère.

A tous mes amis, tout particulièrement Hanane,

Et Nour el houda, chère ami avant d'être binôme

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père et ma très chère maman, qui

m'ont Éclairés le chemin en me donnant

La main tout au Long de mes années d'étude

A mes frères

A mes sœurs

Au mari et aux fils de ma sœur, Yasser et Anas

A mes amis

A tous ceux qui me sont chers

A ceux qui m'ont séparé alors qu'ils étaient sous

le sol, que Dieu ait pitié de vous

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Dieu qui m'a guidé vers le bon chemin et qui m'a donné le courage et la force de continuer ce travail.

J'exprime mon profond remerciement à mes encadreurs, Dr .Noureddine Hadidi, Dr. Redha Rebhi, j'ai le grand plaisir de travailler sous votre direction et profiter de enseignements et vos conseils judicieux et Pertinents.

Je tiens d'exprimer mes sincères gratitudes aux Membres de jury

J'adresse mes profondes gratitudes aux enseignants et responsables du département de génie chimique.

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce Travail.

Sommaire

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Généralité

I.1. Introduction **……....1**

I.2. Généralités sur les trois modes de transfert de chaleur **…….1**

I.2.1. La conduction thermique **……2**

I. 2.2. La convection thermique **……...3**

I.2.3. Rayonnement **……..5**

I.3.Généralités sur transfert de masse**…….....6**

I.4.Milieu poreux **…….8**

I.4.1. Les type des milieux poreux des milieux poreux**……..9**

I.4.2. Volume élémentaire représentatif (VER) **…….....11**

I.4.3. Propriétés structurales et thermo physique d'un milieu poreux**...……....12**

I .4.3.1. La porosité **……....12**

I.4.3.2. Perméabilité**……....13**

I.4.3.3. Tortuosité **…….....14**

I.4.3.4. La surface spécifique **……..15**

I.4.3.5. Conductivité thermique effective**…….....15**

I.4.3.6. La conductivité thermique équivalente **……..17**

I.4.4 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux **……....17**

I.4.4.1Modèle de Darcy **……...17**

I.4.4.2. Modèle de Brinkman **……..17**

I.4.4.3. Modèle de Forchheimer**……...18**

I.4.4.4. Modèle générale **…….....19**

I.5. Approximation de Boussinesq **……19**

I.6. Nanofluides …….....23

I.6.1.Nanoparticules et fluides porteurs…….....23

I.6.2. Types de nanofluides …….....24

I.6.3. Fabrication et préparation des nano fluides ……...…...24

I.6.4. Synthèse des nano fluides ……..……25

I.6.5. Application de nanofluides …….....26

I.6.6.Les propriétés thermo physiques des nano fluides …….....…...26

I.6.6.1. Fraction volumique(Ø) …….....27

I.6.6.2. Viscosité dynamique(μ) ……..27

I.6.6.3. Masse volumique (ρ) ……...28

I.6.6.4. Conductivité thermique (K) ……....29

I.6.6.5. Chaleur spécifique (C_P) ……...31

I.6.6.6. Coefficient d'expansion volumique (β) …….....31

I.6.7. Les avantages des nanofluides …….....31

I.6.8. Les inconvénients des nanofluides…….....32

I.7. Synthèse bibliographique……...32

I.8.Conclusion …….....35

Chapitre II : Modèle physique et formulation mathématique

II.1. Introduction…….....37

II.2. Description……...37

II.3. Simplifier les hypothèses…….....38

II.4. Formulation mathématique …….....39

II.5. Conditions aux limites……..…42

II.5.1. Conditions aux limites hydrodynamiques……..42

II.5.2. Conditions aux limites thermiques et solutale……..….43

II.6. Transfert de chaleur et transfert de masse…….....43

II.7. Conclusion ……...43

Chapitre III : Différences finis

III.1. Introduction……..……45

III.2. Méthode des différences finis **……...45**

III.2.1. Définition de la méthode des différences finis**……45**

III.2.1.1. Maillage**…….....45**

III.2.1.2. Pas de maillage**…….....45**

III.2.2. Principe général de la méthode et ordre de précision**…….....46**

III.2.3. Schémas des différences finies approximant la première dérivée**……...47**

III.2.4. Dérivées d'ordre supérieur**……...…49**

III.2.5. Analyse de l'approximation**……..50**

III.3. Méthode des volumes finis**…….....51**

III.4. Méthode des éléments finis**…….51**

III.5. Conclusion**…….…..51**

Chapitre IV : résultats et discussions

IV.1. Introduction**…….53**

IV.2. Effet de Maillage **……...53**

IV.3. Effet de la fraction volumique des nanoparticules sur la structure de L'écoulement **……..……53**

IV.4. Effet de la fraction volumique nanoparticules sur les profils de fonction de courant **……....55**

IV.5. Effets de la fraction volumique nanoparticules et le nombre de Rayleigh ThermiqueR$_T$, sur la fonction de courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood **……..56**

IV.6. Effets de la fraction volumique nanoparticules et de rapport des forces de volume sur La fonction de courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood**…….…..……58**

IV.7. Effets de la fraction volumique nanoparticules et le nombre de Lewis, sur la fonction De courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood**……60**

Conclusion générale

Liste des figures

Liste des figures

Fig. I.1 : représentation des 3 modes de transfert de chaleur **……..…..1**

Fig. I.2 : transfert de chaleur par conduction **…….....2**

Fig. I.3: Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection **…….....3**

Fig. I.4: transfert de chaleur par convection (a) forcée, (b) naturelle**……....4**

Fig. I.5: Transfert thermique par convection**…….....4**

Fig. I.6: Principe du rayonnement thermique**……....5**

Fig. I.7 : transfert de chaleur par rayonnement[12]**……..6**

Fig. I .8 : transfert de masse dans phase immobile [12]**…….....7**

Fig. I.9: transfert de masse dans phase mobile [12]**…….…....7**

Fig. I.10 : Schématisation de la diffusion moléculaire**…….…...8**

Fig. I .11 : Exemple de coupe d'un milieu poreux(2003) **……....….9**

Fig. I.12 : structure non consolidée**…….....9**

Fig. I .13 : structure consolidée**…….…....10**

Fig. I .14 : porosité d'interstice**…….……..10**

Fig. I.15 : porosité à fissure**…….….11**

Fig. I.16 : Milieu poreux et volume élémentaire représentatif (VER**)……....11**

Fig. I.17 : Le système de porosité Houpert,(1974)**……...12**

Fig. I.18 : Concept de la longueur effective C.W Fetter (1988) **…….....15**

Fig. I.19 : Modèle en série**……...16**

Fig. I.20 : Modèle en parallèle**…….....16**

Fig. I.21 : (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone [28] **……...24**

Fig. I .22 : Procédé de synthèse de nano fluide en une seule étape **[**28] **……...25**

Fig. I.23 : processus de préparation d'un nano fluide en deux étapes **…….…..25**

Fig. II.1 : Représentation schématique du modèle physique et du système de Coordonnée

.....…….…..37

Fig. IV.1 : les lignes de courant, isotherme, isoconcentrations pour A = 1, R_T = 200,

Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° et différentes valeurs de la fraction volumique des Nanoparticules **.....……54**

Fig. IV.2 : Les profils : (a) fonction de courant, | Ψ |, (b) température, T, (c) de la Concentration, S, dans la mi-hauteur de la cavité pour A = 1, R_T = 200, Le = 10, N = 0, Φ = 0° et avec différentes valeurs de la fraction volumique**.....56**

Fig. IV.3 : Variation de (a) la fonction de courant, (b) le nombre moyen de Nusselt, (c) le Nombre moyen de Sherwood gauche pour Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° avec le Nombre de Rayleigh, R_T et différentes valeurs de la fraction volumique des Nanoparticules, ϕ **……...57**

Fig. IV.4 : Effets de la fraction volumique des nanoparticules, ∅, et de la force de Flottabilité, N, pour R_T = 200, Le = 10, Φ = 0 ° sur : (a) la fonction de courant, (b) le Nombre de Nusselt, et (c) le nombre de Sherwood**……..58**

Fig. IV.5 : les lignes de courant, isotherme et isoconcentrations pour : (a) N=2 et N = -2 **....……...60**

Fig. IV.6 : Effets de la fraction volumique des nanoparticules, ϕ et du nombre de Lewis, Le, pour R_T = 200, N = 0, Φ = 0 ° sur : (a) la fonction de courant, (b) moyenne Nombre de Nusselt,Nu_m, et (c)) nombre moyen de Sherwood,Sh_m **…..…..…61**

Fig. IV.7 : Dépendance de la fonction de courant (a) le nombre moyen de Nusselt (b) le Nombre moyen de Sherwood (c) sur l'angle d'inclinaison Φ pour R_T = 200, Le = 10, N = 0 et différentes fractions volumiques de nanoparticules**……..62**

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux**……...…13**

Tableau I.2: valeurs moyennes de perméabilité de quelques matériaux. [13] [14]**……14**

Tableau I.3 : Les propriétés des fluides pour l'eau et l'air à $T_0 = 15C^0$, P_0=1atm**…….....22**

Tableau. II.1 : Propriétés thermo physiques des fluides (eau) et des nanoparticules (Cu) et de la structure solide**…… 40**

Tableau IV.1 : L'effet de la taille du maillage sur le nombre moyen de Nusselt des murs chauds et froids et la valeur absolue maximale de la fonction de flu**x……...53**

Nomenclature

Nomenclature

α	Diffusivité thermique [$m^2 s^{-1}$]
a	Forces inertielles macroscopique
b	Gradient de pression
C	Forces de volumes
C_j	Fraction massique
d	Terme de Darcy
D_{ij}	Coefficient de diffusion binaire $(m^2.s^{-1})$
J_j	Flux massique $(kg\ .m^{-2}.s^{-1})$
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection $(W.m^{-2}.℃^{-1})$
K	Conductivité thermique du milieu $(W.m^{-1}.℃^{-1})$
K_{bf}	Conductivité thermique du fluide de base $(W.m^{-1}.K^{-1})$
K_{nf}	Conductivité thermique du nano fluide $(W.m^{-1}.K^{-1})$
K_p	Conductivité thermique des particules $(W.m^{-1}.K^{-1})$
L	Longueur de l'échantillon poreux ou distance parcourue par le fluide, m
L_e	Longueur effective du déplacement du fluide
L_e	Nombre de Lewis
n	Facteur de forme empirique
Nu	Le nombre de Nusselt.
Pr	Le nombre de Prantl
p	pression, [Pa]
R_T	Le nombre de Rayleigh.
Sh	Sherwood

S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

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

T_a Température du milieu environnant la surface $(°C)$

T_s Température de surface du solide (°C)

T_∞ Température du fluide loin de la surface du solide (℃)

T_0 Température de référence (°C)

$\frac{dT}{dx}$ Gradient de température en x $(k.m^{-1})$

$\vec{V}$ Quantité moyennée à travers un volume élémentaire

V_f Volume du fluide de base (m^3)

V_p Volume des espèces vides

V_{pu} Volume des pores accessibles ou utiles

V_s Volume de solide (m^3)

V_T Volume total

x coordonnée horizontale adimensionnelle

$\boldsymbol{y}$ coordonnée verticale adimensionnelle

Symboles grecs :

β Le coefficient d'expansion volumique thermique [k^{-1}]

β_{nf} Coefficient de dilatabilité du nano fluide

β_f Coefficient de dilatabilité du fluide de base

β_s Coefficient de dilatabilité des nanoparticules

Φ flux thermique (W)

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

ε Facteur d'émission de la surface

ε Porosité

τ Tortuosité

Γ Coefficient de diffusion

ρ Masse volumique $(kg.m^{-3})$

μ_{eff} Viscosité équivalente dans le modèle de Brinkman, [kg m^{-1} S^{-1}]

μ_{nf} Viscosité dynamique du nano fluide

μ_{bf} Viscosité dynamique du fluide de base

$\emptyset$ Fraction volumique des nanoparticules

ρ Masse volumique [kg m^{-3}]

ρ_{nf} Masse volumique du nano fluide (Kg m^{-3}).

ρ_f Masse volumique de fluide (Kg m^{-3}).

ρ_s Masse volumique de solide ($Kg\ m^{-3}$).

Indice :

a milieu environnât la surface

bf fluid de base

eff effective

f fluide de base

j massique

nf nanofluide

p particule

pu pore accessible ou utile

s	solide
T	totale

Résume

ملخص :

الهدف هو دراسة ظاهرة الحمل الحراري الطبيعي للسوائل النانوية في تجويف مسامي ثنائي الأبعاد،حيث تم تحديد التجويف بواسطة متساوي الحرارة ، ويتم الحفاظ على الجدار الساخن عند درجة الحرارة ويتم تبريد الجدار إلى درجة الحرارة ، بينما يتم عزل الجدارين الآخرين. يتم تحليل النتائج العددية من حيث التبسيط ، متساوي الحرارة ،والتركيزات المتساوية وأرقام نسلت وشيروود .

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة ، نقل الكتلة ، وسائط مسامية ، سائل نانو، إحترام محدود .

Résumé :

L'objectif est étudier le phénomène de convection naturelle des nanofluides dans une cavité poreuse bidimensionnelle. La cavité est déterminée par isotherme, la paroi chaude est maintenue à température et la paroi est refroidie à température, tandis que les deux autres parois sont isolées. Les résultats numériques sont analysés en termes de lignes de courant, isothermes, isoconcentrations et des nombres de Nusselt et Sherwood.

Mots clés : transfert de chaleur, transfert de masse, milieux poreux, nanofluide, déférence finies.

Abstract:

The objective is to study the phenomenon of natural convection of nanofluids in a two-dimensional porous cavity. The cavity is determined by isothermal, the hot wall is maintained at temperature and the wall is cooled to temperature, while the other two walls are isolated. Numerical results are analyzed in terms of current lines, isotherms, isoconcentrations and Nusselt and Sherwood numbers.

Keywords: heat transfer, mass transfer, porous media, nanofluid, finite deference.

Introduction Générale

Introduction Générale :

De nos jours, l'un des objectifs de la recherche scientifique dans les industries se rapporte à la résolution des questions relatives aux économies des opérations de transformations d'énergie pour atteindre l'optimum. Dans ce contexte, les études menées se fixent comme objectifs une connaissance détaillée et fiable du comportement des systèmes complexes induits par des matériaux ou fluides nouveaux et en présence des phénomènes de plus en plus variés et induisant des mécanismes nouveaux. Les transferts dans les milieux poreux saturés ont fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux. En raison de leur importance dans de nombreux domaines naturels tels que le déplacement des eaux dans les nappes aquifères et technologiques comme le séchage. Le transfert de chaleur dans les milieux poreux s'effectue essentiellement selon deux modes :1) conduction à travers l'ensemble du milieu poreux sous l'effet des gradients de température, et 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. Le transfert de chaleur par convection naturelle dans un milieu poreux comprend plusieurs effets physiques importants, par exemple, l'effet d'un milieu poreux non Dracéen dû aux forces d'inertie à l'échelle des pores, sur la quantité de mouvement, l'énergie, et transport de masse a été étudié en profondeur pour plusieurs configurations géométriques et conditions aux limites, de telle sorte qu'il existe actuellement le modèle couplé de Brinkman - Forchheimer (modèle généralisé) qui est utilisé par les chercheurs, si le modèle classique(de Darcy) n'est pas valide. Ainsi cette matrice qu'est le milieu poreux n'est pas modélisable simplement et requiert une attention soutenue. Par conséquent, il existe des effets qui ont un intérêt significatif sur le transport thermique dans les milieux poreux, on peut citer à titre exemple, la variation de la porosité, la dispersion thermique et massique, la variation des propriétés physiques de fluide comme la viscosité et la conductivité thermique, l'effet de l'équilibre thermique entre le fluide et le solide, la radiation thermique. . .etc., et parfois, on est dans une situation où un couplage fort de ces effets est mis en place, alors l'étude des phénomènes de transport devient très compliquée. Le besoin d'améliorer les transferts thermiques des fluides a donné naissance au développement des nanofluides. 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 et de matière, les nanofluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications en ingénierie : l'industrie automotrice, le génie

biomédical, le refroidissement des éléments électroniques...etc., et même en milieu poreux rendant la complexité extrême comme deuxième niveau .Le présent travail est organisé en quatre chapitres : Le premier chapitre est divisé par trois parties, la première est le mode de transfert de chaleur et de masse , ensuite à La deuxième partie est consacrée exclusivement aux caractéristiques des milieux poreux, ensuite à l'écoulement de fluide à travers ces milieux , suivi par la théorique Approximation de Boussinesq concernant le transfert thermique dans les milieux poreux saturés d'un fluide , Quant à la partie suivante elle est consacrée à la présentation des l'étude des nanofluides, leurs préparations, leurs propriétés thermo-physiques en précisions et leurs utilisations ainsi que leurs applications dans divers domaines d'industrie. Le deuxième chapitre se présente le modèle physique et formulation mathématique étude le phénomène de convection naturelle du nanofluide Cu-Eau dans un espace confiné, Suivi par un état de l'art réalisé dans ce domaine d'intérêt, .et dans le chapitre troisième étudier la méthode des déférences fines pour l'obtention de solution approchée de problème aux dérivées partielles avec conditions aux limites et conditions initiales. Le quatrième chapitre, nous discutons les résultats obtenus. Ensuite, nous examinons l'influence des paramètres de contrôle du problème sur le transfert de chaleur et de masse. Enfin, nous terminons notre étude avec une conclusion.

Chapitre I

Revue Bibliographique

I.1. Généralité sur le transfert de chaleur :

On appelle (transfert de chaleur) le déplacement de la chaleur d'une région à une autre suite à différence de température, ce déplacement peut se produire entre deux corps en Contact (solide-solide, solide-fluide, fluide-fluide) ou entre deux parties d'un même corps.

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe une différence de température et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare. Le transfert de chaleur donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de chaleur du plus chaud vers le plus froid. On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur [1]

- **La conduction**
- **La convection**
- **Le Rayonnement**

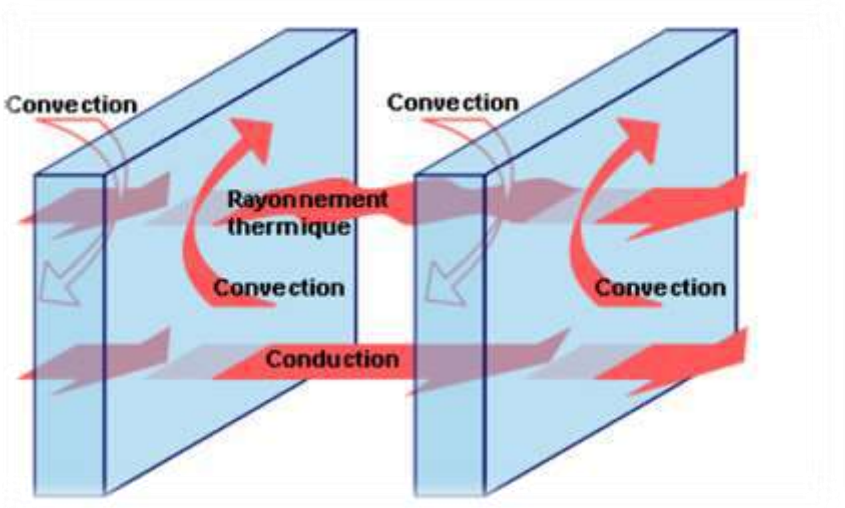


Figure I .1 : représentation des 3 modes de transfert de chaleur [2]

I.1.1.1 Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sans l'influence d'une différence de température. La programmation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par électrons libres. Les nano fluides améliorent et amplifient la conductivité thermique.

La conductivité thermique, notée k (W /m. K), est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. La conductivité thermique par rapport aux les performances thermiques d'un fluide caloporteur est une propriété très importante **[3].**

- ✓ **La loi de Fourier** est la loi principale qui décrit le processus de dégagement de chaleur.

La relation est donnée comme suit :

$$\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dx}}\,dt \qquad \text{(I.1)}$$

$\boldsymbol{d\phi}$: Flux de chaleur transmis par conduction ($\boldsymbol{W}$).

$\boldsymbol{k}$: Conductivité thermique du milieu ($\boldsymbol{Wm^{-1}{\circ}c^{-1}}$).

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

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

Le flux de chaleur ϕ en watt qui circule en x : $\phi=\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{dt}} = -k.\, S\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dx}}.$ (I.2)



Figure I.2 : transfert de chaleur par conduction

I.1.1.2.Transfert de chaleur par convection :

Le phénomène de convection intervient à chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes (murs, plaques, tubes, ...etc.) à des températures différentes de celle du fluide ou lorsque deux fluides à des températures différentes sont mis en contact.

La convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est

naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé

Convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte. [4]

La Figure I.3 montre le schéma de principe de la convection entre un solide dont la température est Ts et l'extérieur (fluide en mouvement) dont la température est T∞.

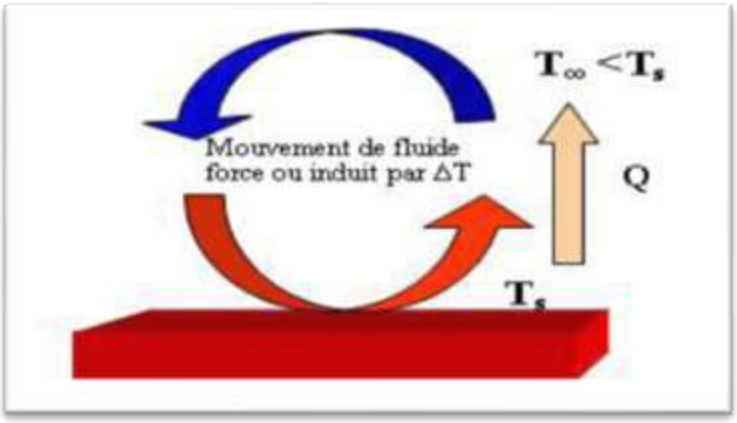


Figure I.3: Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection. [4]

La transmission de chaleur par convection est désignée selon le mode d'écoulement du fluide par :

- ✓ Convection libre (naturel).
- ✓ Convection forcée
- ✓ Convection mixte
- **La convection naturelle :**

En convection naturelle, les mouvements des particules de fluide ont pour origine les différences de masse volumique induites par un gradient de température imposé, en présence du champ de gravités.

- **la convection forcée :**

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique (pompe, ventilateur, etc.) indépendant des phénomènes thermiques, c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.

- **La convection mixte :**

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [5][10]

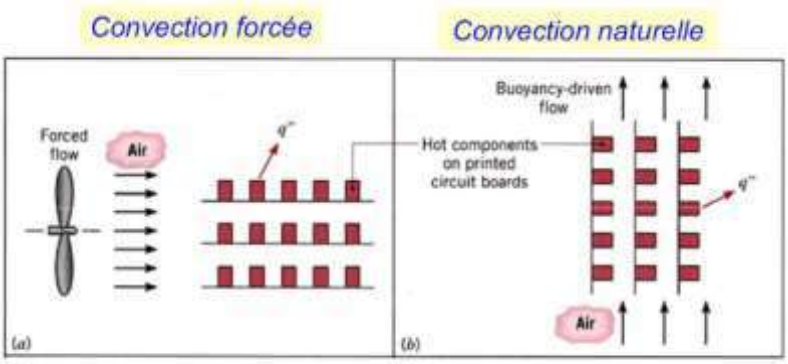


Figure .I.4 : transfert de chaleur par convection (a) forcée, (b) naturelle

C'est par convection que la chaleur, transmise à de l'eau à l'intérieur d'une chaudière, est transportée jusqu' aux différentes pièces d'un appartement.

- C'est par convection qu'un produit chimique est transporté du réservoir dans lequel il est stocké jusqu'à l'appareil dans lequel il est utilisé.

Le flux de chaleur échangé entre la surface et le fluide en mouvement est régi par la **Loi de Newton** :

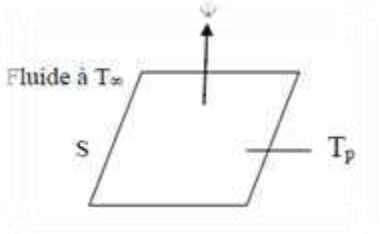


Figure I.5: Transfert thermique par convection

$$\phi = hS\,(T_s - T_\infty) \qquad \text{(I.3)}$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

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

Ts : Température de surface du solide (°C)

$T\infty$: Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

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

I.1.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le terme rayonnement est appliqué à l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre les corps par des ondes électromagnétiques. Les échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques. L'action d'un Rayonnement sur un milieu dépend de sa longueur d'onde. On retiendra que le rayonnement thermique émis par les corps se situe entre k (10^{-7}m et 10^{-4} m) et se divise en deux : le spectre visible, le spectre invisible. Exprimer la relation suivante :

$$\phi = \varepsilon.\sigma.S\,(Ts^4 - Ta^4) \qquad (I.4)$$

$\boldsymbol{\phi}$: Flux thermique ($\boldsymbol{W}$).

$\boldsymbol{\sigma}$ **:** Constante de Stéphan Boltzmann 5.67.10-8 ($\boldsymbol{Wk^{-4}m^{-2}}$).

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Facteur d'émission de la surface.

$\boldsymbol{S}$: La surface de contact solide/fluide ($\boldsymbol{m}^2$).

$\boldsymbol{Ts}$: Température de la surface ($\boldsymbol{K}$).

$\boldsymbol{Ta}$: Température du milieu environnant la surface ($\boldsymbol{K}$).

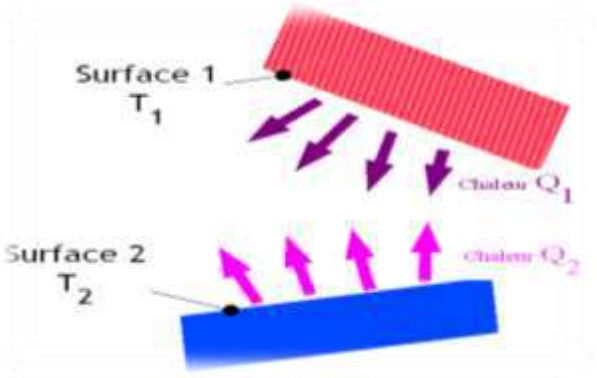


Figure .I.6 : Principe du rayonnement thermique [11].

Exemple :

- La chaleur que reçoit la terre à partir du soleil se fait grâce aux rayonnements.

- Les plats sont chauffés dans un four à micro-ondes grâce à la chaleur transportée par des rayonnements micro-ondes.



Figure. I.7 : transfert de chaleur par rayonnement[12]

I.2.Transfert de masse

Lorsqu'on s'intéresse au transfert de matière, on doit distinguer deux cas, selon que le transfert se fait au sein d'une phase ou entre deux phases partiellement ou totalement immiscibles. En outre, chacune des phases peut être mobile ou immobile[12].

- **Phase immobile :** Une phase immobile ne signifie pas qu'il n'y a pas de mouvement d'ensemble des molécules, mais au niveau de la phase, le transport se fait uniquement par **diffusion moléculaire**, et il n'existe pas dans la phase de tourbillons provoquant - avec une dégradation d'énergie mécanique et de quantité de mouvement - le brassage d'agrégats de fluide ayant des compositions différentes.

❖ **Diffusion**

La diffusion est un processus lent : les molécules migrent dans un solide ou dans un fluide considéré comme immobile (écoulement laminaire).

Exemple : diffusion des molécules de sucre, dispersion par agitation moléculaire suivant des trajectoires aléatoires entre les molécules d'eau. Diffusion

- Un morceau de sucre dans un tasse de café. Celui-ci commence à fondre et se répand dans la tasse par diffusion
- Les molécules de sucre plongées dans du café essayent de se frayer un chemin à travers les molécules de liquide.

- La diffusion résulte d'une différence de concentration : quand le sucre fond, la concentration en sucre, qui était maximum au fond de la tasse et nulle à la surface, va changer plus ou moins rapidement, et tout le café sera finalement sucré.

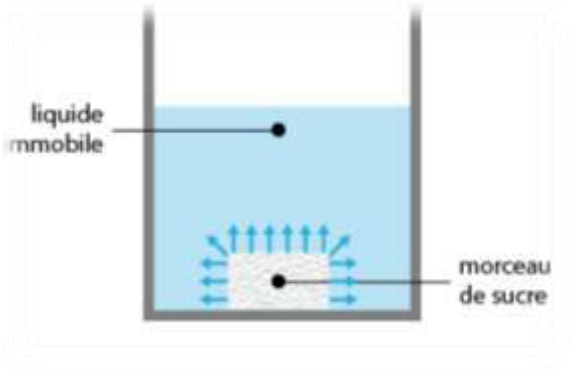


Figure I.8 : transfert de masse dans phase immobile [**12**]

- **Phase mobile :** Par opposition, dans le cas d'une phase mobile, le transport
  Par diffusion des constituants n'est pas dû uniquement à la diffusion moléculaire mais aussi à la diffusion turbulente (Convection).

- **Diffusion moléculaire :** est un mouvement spontané des molécules (atomes ou ions) des régions ou leur concentration est élevée vers les zones où celle-ci est plus faible, voire nulle**.**
- **Diffusion turbulente :** tourbillons provoquant le brassage d'agrégats de fluides de différentes compositions.
- **Convection :** La convection est un processus rapide : les molécules sont entraînées dans un courant de fluide naturel ou forcé (convection naturelle ou forcée).
- **Exemple** : l'agitation avec une cuillère est une convection forcée



Figure I.9:transfert de masse dans phase mobile [**12**]

- **Loi de diffusion de Finck pour un mélange**

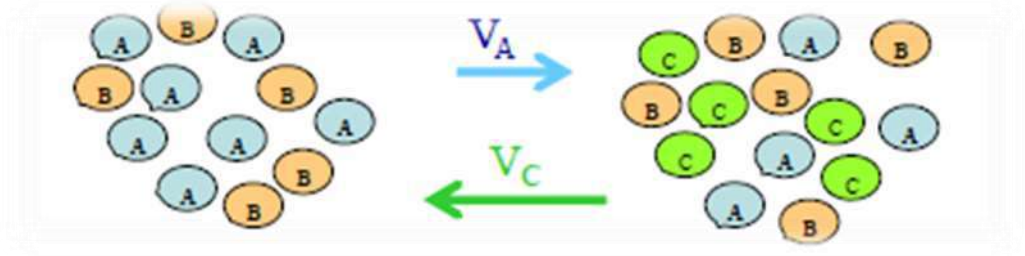


Figure I.10 : Schématisation de la diffusion moléculaire[12]

- ✓ **Forme générale :**

La loi exprime une relation linéaire entre le flux de matière et le gradient de concentration de celle-ci.

$$J_j = -\rho D_{ij} \nabla c_j \qquad (I.5)$$

Avec :

J_j : Flux massique$(kg.m^{-2}.s^{-1})$,

ρ : Masse volumique$(kg.m^{-3})$,

D_{ij} : Coefficient de diffusion binaire$(m^2.s^{-1})$,

c_j : Fraction massique (sans unité),

I.3.Le milieu poreux :

Un milieu poreux est une matrice solide rigide qui comporte des vides(pores), distribués d'une façon désordonnée dans tout le milieu, qui peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides (gaz ou liquide) pouvant s'écouler et, éventuellement, échanger entre elles et/ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie. Les pores d'un milieu poreux peuvent être très grands ou trop petits. Ils se présentent sous forme de structures géométriques simples ou complexes de dimensions irrégulières. Leur distribution dans un milieu poreux est pratiquement toujours variable et désordonnée. Ils peuvent être connectés ou isolés, soudés (consolidés) ou non. On peut distinguer plusieurs exemples de matériaux poreux rencontrés dans la nature ou dans l'industrie, il peut s'agir d'empilement de

billes, de panneaux de fibres, de béton, du bois, de roches ou bien de structures géologiques comme les bassins sédimentaires, les gisements de pétrole ou les couches aquifères [13].

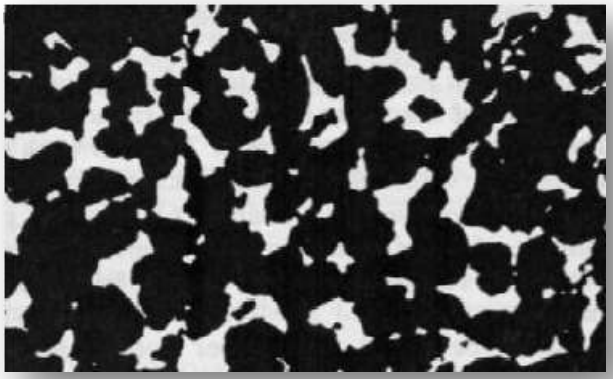


Figure 1.11: Exemple de coupe d'un milieu poreux M. NICOLAS, (2003).

I.3.1. Les type des milieux poreux :

Les milieux poreux sont de très vaste variété et de nature. Leur classification se fait selon :

I.3.1.1. La matrice solide :

Selon la matrice solide, on distingue :

- **Non consolidée :** la phase solide est alors formée de grains ou de fibres non soudés entre eux (graviers, sables, limons, billes de verre et d'acier, matériaux divers...) ; les billes de verre

  Sont notamment très utilisées en laboratoire pour étudier les phénomènes de transfert en milieu poreux **[14].**



Figure. I.12: structure non consolidée

- **Consolidée :** dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en

Grains ou fibres (roches calcaires, grés, argiles, bois, céramiques, poudres frittées,

Tissus végétaux et animaux...).



Figure. I.13 : structure consolidée

I.3.1.2.Les pores :

Selon les pores, on distingue :

- **Porosité d'interstice :**

  La porosité d'interstice représente les vides autour des particules solides plus ou moins liés les uns aux autres.

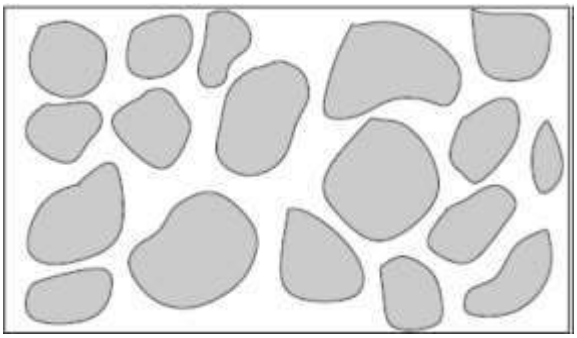


Figure. I.14: porosité d'interstice

- **Porosité à fissure :**

La porosité à fissure correspond à des fractures (fissures) dans la matrice.

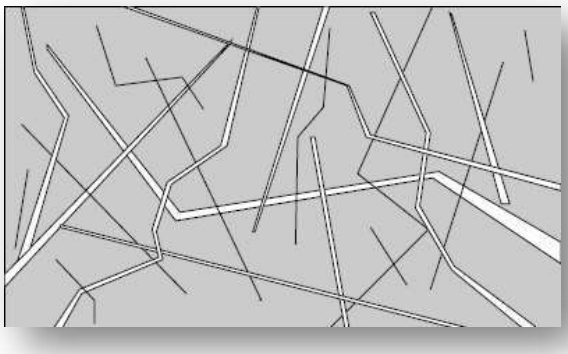


Figure. I.15: porosité à fissure

I.3.2. Volume élémentaire représentatif (VER)

Le volume élémentaire représentatif (VER) réfère à l'ensemble de volumes élémentaires du matériau qui produisent, en moyenne, les propriétés effectives du composite. En effet, les grandeurs macroscopiques caractérisant un milieu poreux peuvent être assimilées à des moyennes des grandeurs microscopiques correspondantes, prises sur un domaine dont la taille est grande devant l'échelle de leurs fluctuations microscopiques, mais petite devant celle des variations à l'échelle macroscopique. Plusieurs définitions quantitatives du VER, détaillant les méthodes de sa détermination, ont été proposées dans la littérature dont la méthode de prise de moyenne Whitaker [15] et la méthode d'homogénéisation périodique Keller, [16], Millet et al [17].

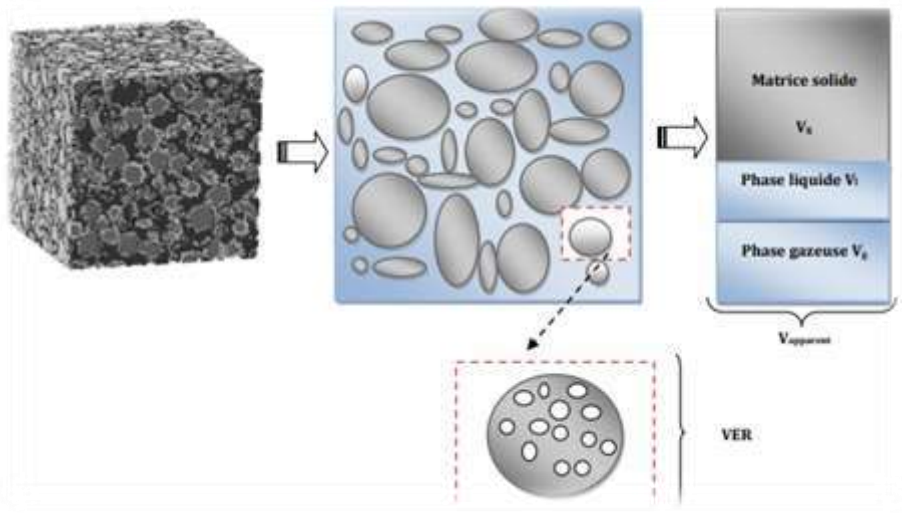


Figure I. 16 : Milieu poreux et volume élémentaire représentatif (VER)

I.3.3. Propriétés structurales et thermo physique d'un milieu poreux :

Différentes grandeurs géométriques et thermo- physiques sont utilisées pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur se produisant dans un milieu poreux, nous pouvons citer :

I.3.3. 1.La porosité :

La porosité totale dans un milieu poreux est définie comme étant le rapport du volume occupé par les espèces vides au volume total

$$\mathcal{E} = Vp / V_T \qquad (I.6)$$

Où :

V_P : Volume des espèces vides

V_T : Volume total

En général, la porosité totale ne présente pas d'intérêt, car seuls les pores accessibles jouent un rôle actif. On définit donc la porosité effective ou utile :

$$\mathcal{E} = V_{PU} / V_T \qquad (I.7)$$

Où : V_{PU} : volume des pores accessibles ou utiles (c'est-à-dire communiquant entre eux).

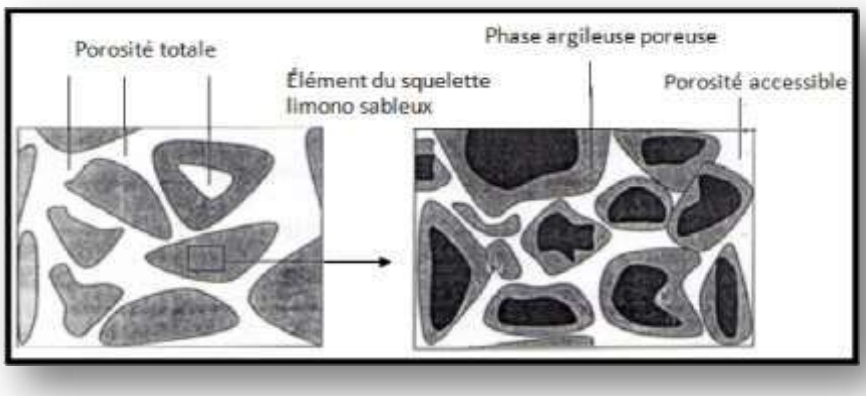


Figure. 1.17: Le système de porosité Houpert, (1974)

Le tableau (1.1) nous donne quelque valeur de la porosité de certains matériaux d'après les mesures expérimentaux rapportées par Sheidegger [18] en 1974

SUBSTANCE	POROSITE
Matériau mousseux	0,98
Fibre de verre	0,88-0,93
Fil à tisser	0,68-0,76
Grain de silice	0,65
Poudre d'ardoise noire	0,57-0,66
Cuir	0,56-0,59
Terre	0,43-0,54
Sable	0,37-0,70
Empilement de sphères	0,36-0,43
Poudre de silice	0.37-0.49
Catalyseur	0,45
Granulé de pierres	0,44- 0,45
Filtre de cigarettes	0,17-0,49
Briques	0,16-0,34
Poudre de cuivre	0,09- 0,34
Pierre à chaud, Dolomite	0 ,04-0,10
Houille	0,02-0 ,07

Tableau I.1 : Valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux.

I.3.3.2. Perméabilité

La perméabilité traduit la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité notée K dépend uniquement de la porosité et de la géométrie de la matrice solide. La relation de Konzeny-Carmen (1937), donne une estimation de la perméabilité K pour un milieu poreux non consolidé constitué d'éléments identiques de géométrie simple :

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{36 C_0 (1-\varepsilon)^2} \qquad (I.8)$$

Ou d désigne une dimension caractéristique des éléments constituant la matrice poreuse et C_0 une constante dépondant de la forme des grains ($3.6 < C_0 < 5$).

Ergum, établit une expression semblable à l'équation de Kozney-Carmen en considérant l'écoulement unidirectionnel d'un fluide incompressible au sein d'une colonne poreuse constituée de particules sphérique, de diamètres d, et soumise à un gradient de pression :

$$k = \frac{d^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \frac{\cup_{nf}}{\cup_{bf}} = 1 + 2.5\emptyset \qquad \text{(I.9)}$$

Ce qui correspond à une valeur de C_0 de la loi Konzney-Carmen de 4.16.

Le tableau ci-dessous représente la perméabilité de quelques matériaux poreux définis d'après Sheidegger. [18]

Matrice	**Perméabilité [m^2]**
Brique	$4.8.10^{-15}$-$2.2.10^{-13}$
Pierre à chaud, Dolomite	$2.0.10^{-15}$-$4.5.10^{-14}$
Cuir	$9.5.10^{-14}$-$1.2.10^{-13}$
Poudre d'ardoise noire	$4.9.10^{-14}$-$1.2.10^{-13}$
Terre	$2.9.10^{-13}$-$1.4.10^{-11}$
Fibres de verre	$2.4.10^{-11}$-$5.1.10^{-11}$
Sable	$2.0.10^{-11}$-$1.8.10^{-10}$
Cheveux artificiels	$8.3.10^{-10}$-$1.2.10^{-9}$
Plaque de liège	$3.3.10^{-10}$-$1.5.10^{-9}$
Fils à tisser	$3.8.10^{-9}$-1.10^{-8}
Cigarette	$1.1.10^{-9}$

Tableau I.2 : valeurs moyennes de perméabilité de quelques matériaux. [18] [19]

I.3.3.3. Tortuosité :

Dans le but de mieux appréhender les chemins d'écoulement, il convient de préciser les notions de tortuosité et connectivité : [20].

La tortuosité" $\boldsymbol{\tau}$ " du milieu caractérise les obstacles au cheminement du fluide dans la structure poreuse, elle est définie comme un rapport de la distance effective du déplacement "L_e" sur la distance parcoure par le fluide "L", ou bien par le carré de rapport donnée par "Quenard"(1991).

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2 \quad (I.10)$$

L_e : longueur effective du déplacement du fluide, c'est à dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon.

L : longueur de l'échantillon poreux ou distance parcourue par le fluide, dans la direction de l'écoulement.

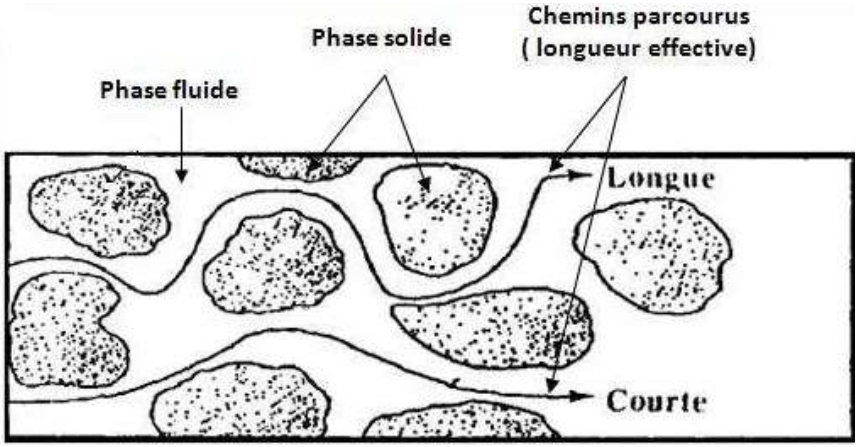


Figure 1.18Concept de la longueur effective C.W Fetter (1988)

I.3.3.4. La surface spécifique :

La surface spécifique est définie comme l'aire totale des vides rapportée à l'unité de volume, soit :

$$A_S \frac{\text{Aire totale des vides}}{\text{Volume totale du milieu}} \quad (I.11)$$

I.3.3.5. Conductivité thermique effective :

Le transfert de chaleur par conduction à travers un milieu poreux nécessite la contribution des deux phases, fluide et solide, constituant la matrice poreuse, qui se fait génialement avec des proportions différentes. A cet effet, l'introduction d'une conductivité qui tient compte de l'apport de chaque phase est importante danse la modélisation du transfert de chaleur dans un milieu poreux. Ainsi, la notion de la conductivité thermique effective est apparue pour donner un sens à un milieu hétérogène poreux. Cette dernière est fortement dépendante de la porosité et des conductivités thermique des phases solide et fluide. D'une manière générale.

Les modèles proposés sont tous combinaisons pondérées des modèles en série et en parallèles basés sur l'analogie électrique. [13]

- **Modèle en série :** Dans le modèle en série, le flux de chaleur traverse successivement les phases solide et fluide. La résistance thermique de fluide est alors égale à la somme des résistances thermiques dans chacune des phases **(Figure. I.19).**

$$\frac{1}{k} = \frac{\varepsilon}{k} + \frac{(1-\varepsilon)}{k} \qquad \text{(I.12)}$$

- **Modèle en parallèle :** Dans le modèle parallèle, le flux de chaleur traverse les deux phases fluide et solide en même temps, La conductivité thermique effective est alors une moyenne arithmétique des conductivités thermiques phasiques **(Figure I.20).**

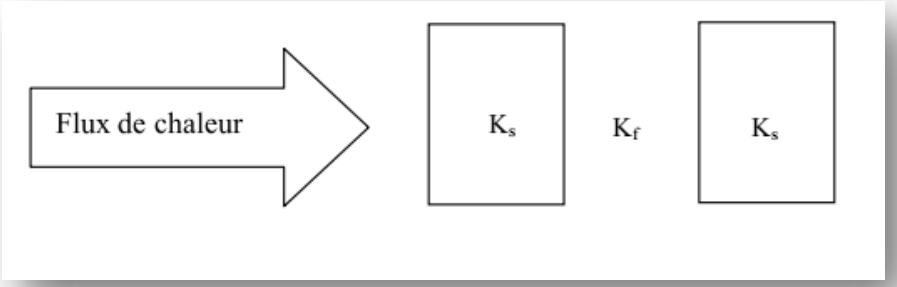


Figure I.19 : Modèle en série

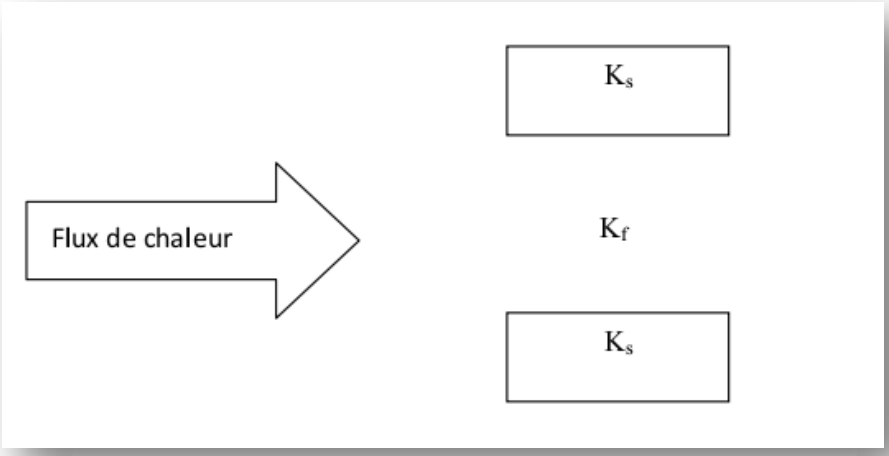


Figure I.20 : Modèle en parallèle

I.3.3.6. La conductivité thermique équivalente :

La conductivité équivalente est une fonction complexe des conductivités du solide et du fluide. En générale, on ne pourrait pas évalue la valeur exacte de la conductivité. Le moyen efficace est la mesure expérimentale dans les conditions d'utilisation en régime permanent. Pour plus de détail sur l'évaluation de la conductivité, nous pouvons citer les travaux de, TOBBAL et BENNACER (1997), BEJI (1989). [21][22]

I.3.4. Modèles d'écoulement en milieux poreux

Il existe différents modèles pour décrire les écoulements dans les milieux poreux qui sont construits à partir du modèle de base qui est le modèle de Darcy avec les différentes extensions en tenant compte de certains effets présents dans les milieux poreux, on distingue à cet effet [13] :

I.3.4.1. La loi de DARCY :

L'étude fondatrice des écoulements dans les milieux poreux a été réalisée par
L'ingénieur Darcy en 1856 avec un (mémoire sur les fontaines publiques de ville de Dijon). Il a mis en évidence une relation linière entre la vitesse et le gradient de pression appliqué de part et d'autre du matériau poreux, elle s'écrit [23] :

$$\vec{V}P = -\frac{\mu}{K}\vec{V}+\rho\vec{g} \qquad (I.13)$$

Où :$\vec{V}$ Est la vitesse de filtration, et sont respectivement, la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide, K : la perméabilité du milieu poreux, P le gradient de pression appliquée et $\vec{g}$ levecteur accélération de la pesanteur. La loi de Darcy
S'applique Au milieu poreux homogène et isotrope parcouru par un écoulement à faible vitesse.

I.3.4.2. Modèle de BRINKMAN :

Dans le cas où la porosité est importante (de l'ordre de 0.8), il faut tenir compte des effets rediffusion visqueuse au niveau des parois (Delache, 2005). Pour cette situation Brinkman (1947) propose de modifier l'équation de Darcy de la façon suivante :

$$\vec{\nabla}P = \rho_f.\vec{g} - \frac{\mu_f}{K}.\overrightarrow{V_{fil}} + \mu_{eff}.\nabla^2\overrightarrow{V_{fil}} \quad (I.14)$$

Où :

$\mu_{eff} = \mu[1 + 2.5(1 - \varepsilon)]$ (I.15), représente la viscosité effective du milieu poreux. En

Général μ_{eff} est considéré équivalente à la viscosité dynamique μ donc on peut donner la vitesse de filtration comme suit :

$$\overrightarrow{V_{fil}} = -\frac{K}{\mu}\left[\vec{\nabla}P - \rho_f\vec{g}\right] + K\nabla^2\overrightarrow{V_{fil}} \quad (I.16)$$

Adoptant le modèle de Brinkman et introduisant l'approximation de Boussinesq, l'équation de la conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$V_{fil} = -\frac{K}{\mu}\left[\vec{\nabla}P - \rho_0\vec{g}\left(\beta(T - T_0)\right)\right] + K\nabla^2\overrightarrow{V_{fil}} \quad (I.17)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right) \quad (I.18)$$

β : Le coefficient d'expansion volumique thermique du fluide,

T_0 : la température de référence.

I.3.4.3. Formulation de FORCHHEIMER :

La formulation de DARCY-FORCHHEIMER (1901) la plus couramment utilisée, pour décrire l'écoulement d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux homogène et isotrope, en régime stationnaire et en présence de pesanteur, est la suivante :

$$\nabla P = pg - \frac{\cup}{k}V + \frac{bp}{\sqrt{k}}|V|\ V \quad (I.19)$$

Ou b est un paramètre caractéristique de la géométrie du milieu poreux, appelé paramètre de FORCHHEIMER. Résultant de la prise de moyenne sous fortes hypothèses, cette formulation introduit un terme convectif qui exprime la contribution inertielle devenant importante avec les (R e) croissant.

Cette loi empirique est connue sous le nom de formulation de DARCY-BRINKMEN,

Fortement utile pour les cas des hautes porosités. Le premier terme de droite de l'équation ci-dessus contenant la viscosité μest le terme de Darcy et le deuxième contenant la viscosité effective μ_{eff} est appelé le terme de Brinkman.

La difficulté dans l'utilisation de ce modèle réside dans l'évaluation de la viscosité équivalente du milieu μ_{eff}. En effet cette grandeur est fonction non seulement de la porosité du milieu mais aussi de sa géométrie (tortuosité).

Brinkman a assimilé la viscosité équivalente du milieu à celle du fluide ($\mu_{eff} \approx \mu$). Cette approximation a été prouvée expérimentalement et elle est en accord avec les travaux de Neal et Nader [24] et Beckermann et viskanta [25]. Le modèle de Brinkman.

Permet ainsi d'imposer la condition de non glissement au champ de vitesse de filtration, au niveau des parois imperméables.

3.4.4. Modèle général

On généralise les trois dernières équations en introduisant un terme transitoire et le terme convectif (VΔ) V ce qui conduit à l'équation suivante :

$$\underbrace{\frac{\rho_f}{\varepsilon}\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon}(\vec{V}\nabla)\vec{V}}_{a} = \underbrace{-\vec{\nabla}P}_{b} + \underbrace{\rho\vec{g}}_{c} - \underbrace{\frac{\mu}{K}\vec{V}}_{d} + \underbrace{\frac{c_f\rho_f}{\sqrt{K}}\vec{V}\vec{V}}_{e} + \underbrace{\mu_{eff}\nabla^2\vec{V}}_{f} \qquad (I.20)$$

$\vec{V}$: Une quantité moyennée à travers un volume élémentaire.

(a) : Forces inertielles macroscopiques.

(b) : Gradient de pression.

(c) : Forces de volumes.

(d) : Terme de Darcy.

Cette équation est équivalente à l'équation de NAVIER STOKES issue du bilan de quantité de mouvement en milieu fluide. Il faut également noter que la complexité d'un écoulement en milieu poreux peut être le résultat des effets d'inertie et de viscosité, et d'une variation importante de la porosité au niveau des parois.

I.4.Approximation de Boussinesq :

L'approximation de Boussinesq est la base pour la plupart de ce qui est connu à propos de la convection naturelle. L'application de cette approximation aux problèmes technologiques et

environnementaux ne peut avoir un sens que lorsque les conditions dans lesquelles les équations de Boussinesq sont valides est explicitement connues.

L'approximation que nous allons reprendre attribuée à Boussinesq (1903), a en fait été également proposée par Oberbeck (1879) pour la première fois en 1879.

Cette approximation commence avec les formes habituelles des équations : la continuité, le mouvement et l'énergie, pour le fluide newtonien à des propriétés variables et zéro seconde viscosité, Batchelor (1967) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial V_j}{\partial x_i} = 0 \tag{I.21}$$

$$\rho \frac{DV_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g k_i + \frac{\mu \partial \Gamma_{ij}}{\partial x_j} + \Gamma_{ij} \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \tag{I.22}$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{K \partial^2 T}{\partial x_j^2} + \frac{\partial K}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \alpha T \frac{DP}{Dt} + \mu \Phi \tag{I.23}$$

$$Ou\ \Gamma_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \text{et } \Phi = \frac{1}{2} \Gamma_{ij} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \tag{I.24}$$

Afin de compléter la description du problème, il faut aussi connaitre des relations pour la détermination des propriétés des fluides. Étant donné que le seul mode réversible de travail pour un fluide newtonien est la compression. Ses propriétés sont des fonctions de deux variables thermodynamiques. Par conséquent, les équations nécessaires peuvent être écrites comme :

$$\rho = \rho(T,P), \quad C_p = C_p(T,P), \mu = \mu(T,P)$$

$$\beta = \beta(T,P), \quad k = k(T,P) \tag{I.25}$$

Habituellement, ces fonctions sont imparfaitement connues et doivent être déduites des données tabulaires. Finalement, nous allons exiger que la plupart de ces propriétés soient estimées de manière adéquate par des valeurs constantes. Il n'y a généralement pas de difficulté à assumer des développements de Taylor linéarités, mais le cas particulier de l'eau à 4°C doit toujours être gardé à l'esprit. Il convient également de noter que l'approche générale de cette dérivation ne repose pas sur l'utilisation des variations des propriétés linéarités.

Les approximations linéarités aux équations (I.25) sont :

$$\left.\begin{array}{c}\rho = \rho_0[1-\beta_T(T-T_0)+\beta_P(P-P_0)] \\ C_P = C_{P0}[1-a_0(T-T_0)+b_0(P-P_0)] \\ \mu = \mu_0[1-a_1(T-T_0)+b_1(P-P_0)] \\ \alpha = \alpha_0[1-a_2(T-T_0)+b_2(P-P_0)] \\ k = k_0[1-a_3(T-T_0)+b_3(P-P_0)]\end{array}\right\}$$

Où

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T}, \quad \beta_P = \frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial P}, \quad a_0 = \frac{1}{C_P}\frac{\partial C_P}{\partial T}, \quad b_0 = \frac{1}{C_P}\frac{\partial C_P}{\partial P}, \quad a_1 = \frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\partial T} \tag{I.26}$$

$$b_1 = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\partial P}, \quad a_2 = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial T}, \quad b_2 = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial\alpha}{\partial P}, \quad a_3 = \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial T}, \quad b_3 = \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial P} \tag{I.27}$$

Et ou l'indice 0 indique l'état de référence (T_0, P_0).

Comme exemples concrets de la méthode qu'on vient de présenter, cette dernière examine les cas de l'eau et de l'air à $T_0 = 15C^0$ et P_0=1atm. Tableau (I. 3) présente les constantes requises, obtenues à partir de Batchelor (1967), sauf indication contraire. Pour l'eau, les conditions la plus exigeante sont exprimées par :

$$\left.\begin{array}{c}\theta \leq 1.25C^0 \\ L \leq 2.4\times10^5 cm \\ L/\theta = 9.9\times10^4\, cm/C^0\end{array}\right\}$$

Dans le cas de l'air, on obtient des résultats similaires. Les conditions la plus exigeante sont exprimées par :

$$\left.\begin{array}{c}\theta \leq 28.6C^0 \\ L \leq 8.3\times10^4 cm \\ L/\theta < 1020\, cm/C^0\end{array}\right\}$$

	Eau	Air
$\rho_0[g/cm^3]$	1.00	1.2×10^{-3}
$C_{p0}[ergs/gm\,C]$	4.2×10^{7}	10^{7}
$\vartheta_0[cm^2/S]$	1.1×10^{-2}	0.145
Pr	8.1	0.72
$\beta_T[C^{-1}]$	1.5×10^{-4}	3.5×10^{-3}
$\beta_P[cm^2/dyn]$	4.9×10^{-11}	10^{-6}
$a_0[C^{-1}]$	-2.4×10^{-4}	4.5×10^{-5}
$b_0[cm^2/dyn]$	-2.5×10^{-10}	1.9×10^{-9}
$a_1[C^{-1}]$	-2.7×10^{-2}	2.8×10^{-3}
$b_1[cm^2/dyn]$	-2.7×10^{-11}	0.0
$a_2[C^{-1}]$	8.0×10^{-2}	-3.6×10^{-3}
$b_2[cm^2/dyn]$	0.0	0. 0
$a_3[C^{-1}]$	1.7×10^{-3}	2.4×10^{-3}
$b_3=[cm^2/dyn]$	4.3×10^{-10}	0.0

Tableau I.3 : Les propriétés des fluides pour l'eau et l'air à $T_0 = 15C^0$, P_0=1atm

La résolution d'un problème de convection naturelle en milieu poreux se ramène à prédire les champs de température, de concentration, et de vitesse ainsi que l'intensité de l'écoulement

en fonction des divers paramètres du problème. Il est également important de prédire les taux de transfert thermique et massique correspondant.

I.5.Nanofluide :

Les nanofluides sont des dispersions des particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100nm) appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés.

I.5.1. Nanoparticules et les fluides porteurs :

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimiste es les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires [26]

Les nano particules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides sont :

- **Les nanoparticules métalliques :**
- L'aluminium, Al.
- Le cuivre, Cu.
- L'or, Au.
- L'argent, Ag.
- La silicone, Si.
- **Les nanoparticules non métalliques :**
- Les nanotubes de carbone, CNT.
- Le diamant.
- **Les nanoparticules des oxydes métalliques :**
- L'oxyde d'aluminium, Al2O3.
- L'oxyde de cuivre, SiO2.
- L'oxyde de silicium, SiO2.
- L'oxyde de titanium, TiO2.
- **Les liquides de base les plus utilisés sont :**
- L'eau.

- L'éthylène-glycol, EG.
- Les huiles.
- Le Toluène.
- Les fluides de réfrigération (R12, R22…) [27]

I.5.2. Type des nanofluides

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion. D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories : figure (I.21)

- 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 cuivre (oxyde d'aluminium Al2O3, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO2…).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO2, nanotube de silicium…)

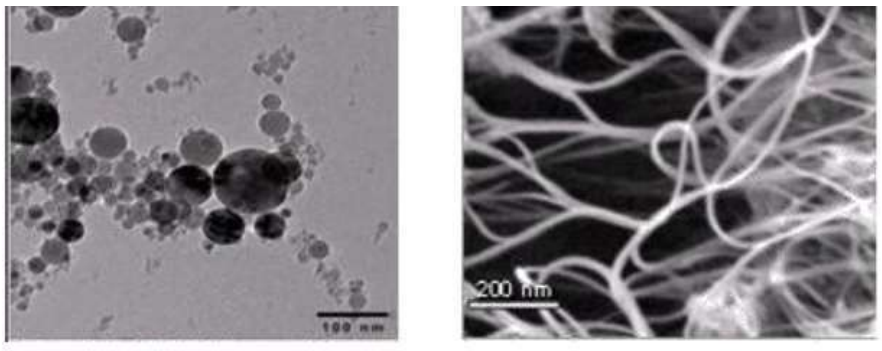


Figure I.21:(a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone [28]

I.5.3. Fabrication et préparation des nano fluides :

Un grand nombre de nanoparticules sont classées en deux catégories :

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique ;
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

  Les nanoparticules sont produites de deux manières :

- **La méthode en une seule étape :** les nanoparticules sont produites dans le fluide de base. Utilisées pour certains nano fluides, évitent l'oxydation et la décantation des particules, est moins industrielle.

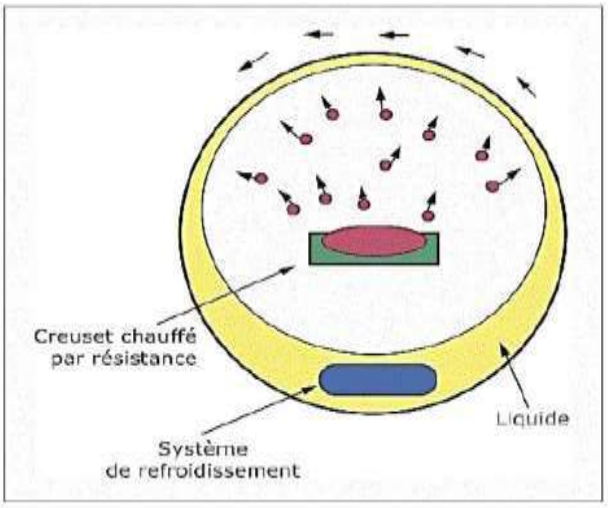


Figure. I.22: Procédé de synthèse de nano fluide en une seule étape [28]

- **La méthode en deux étapes :** les nanoparticules sont produites une fois et dispersées dans le fluide de base. Il évite les ajustements en raison des forces attractives entre les molécules et effectue un bon travail mécanique. Pour ajuster le pH, la surface de la particule doit être chargée en utilisant une répulsion électrostatique.

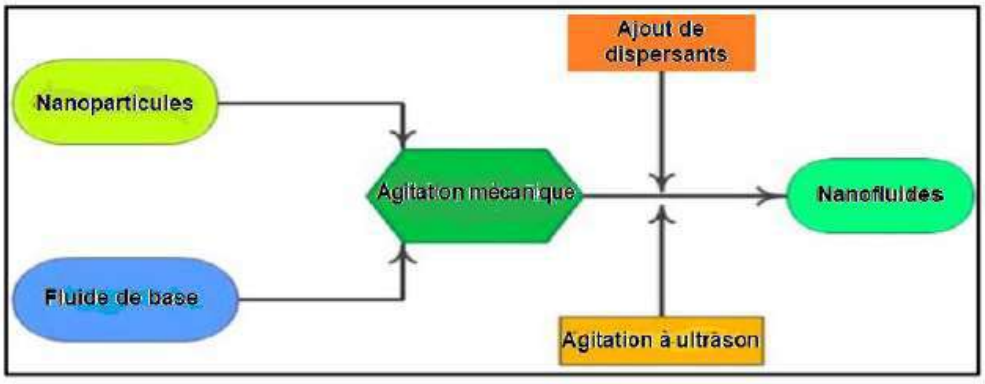


Figure. I.23 : processus de préparation d'un nano fluide en deux étapes

I.5.4.Synthèse des nanofluides :

Les nanofluides sont produits par plusieurs techniques :

- Evaporation directe (1 étape)
- Condensation / dispersion de gaz (2 étapes)
- Condensation chimique en phase vapeur (1 étape)
- Précipitation chimique (1 étape)
- Bio source (2 étapes)

Plusieurs liquides, dont l'eau, l'éthylène glycol et les huiles, ont été utilisés comme fluides de base. Bien que la stabilisation puisse être un défi, les recherches en cours indiquent que c'est possible. Les nanomatériaux utilisés jusqu'à présent dans la synthèse des nano fluides comprennent les particules d'oxyde, les nanotubes de carbone, les nano-flocons de Graphème et les particules de céramique.

I.5.5. Les applications des nanofluides

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'application pour leurs propriétés magnétique (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électrolomoillage pour lentilles liquides, et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisée.

En thermique, les nano fluides peuvent être utilisés partout ou des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électrique et électronique, radars, automobile…).

Les nano fluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des micros Electro Mechanical System [29].

- **Autres applications**
  - ✓ L'échangeur de chaleur.
  - ✓ Le refroidissement d'éléments électriques (produire un nano fluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électronique).
  - ✓ Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulation de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entrainer une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).
  - ✓ Aéronautique et spatial.

- ✓ Refroidissement des systèmes nucléaire.
- ✓ Transport (gestion de refroidissement /véhicule moteur thermique).
- ✓ Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).

I.5.6. Les propriétés thermo physiques des nanofluides :

Les nano fluides ont des propriétés physiques importantes, qui différent selon les nanoparticules utilisées et le fluide de base. Ses caractéristiques sont :

- ❖ La fraction volumique (φ)
- ❖ Conductivité thermique(K).
- ❖ Viscosité dynamique(μ)
- ❖ La masse volumique (p)
- ❖ La chaleur massique (Cp)
- ❖ Coefficient d'expansion volumique (β)

On supposera que les nanoparticules dans le fluide de base peuvent être facilement fluidisées et par conséquent, le modèle à une seule phase, ou la phase fluide et les nanoparticules sont en état d'équilibre thermodynamique et se déplacent à la même vitesse locale, est adopté. Les propriétés thermo physique du fluide dépendent de la concentration, de la température et de volume des nanoparticules.

I.5.6.1.La fraction volumique(ø)

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nano fluide. Puisque les calculs de toute l'autre propriété sont basés sur la fraction volumique du nanofluide, On peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique varie entre 0(fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$Ø = \frac{\text{volume de solide}}{\text{volume total du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_{s+}V_f} \qquad \text{(I.28)}$$

Avec :

Vs : Volume de solide (nanoparticules) [m^3]

V_f : Volume du fluide de base [m^3]

I.5.6.2. Viscosité dynamique(μ)

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nano fluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maitrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans différentes applications.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions :

A. Modèle d'Einstein (1906)

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par la relation d'Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides, la relation d'Einstein et la suivante : [30]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\emptyset \qquad \text{(I.29)}$$

Avec :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano fluide

μ_{bf} : La viscosité dynamique du fluide de base

Ø : la fraction volumique des nanoparticules

Cette relation valable juste pour $\emptyset < 0,03$.

B. Modèle de Brinkman(1952)

Par contre, Brinkman a généralisé la formule d'Einstein pour qu'elle puisse être utilisée dans une large plage de concentrations volumiques. [31]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\emptyset)^{\frac{5}{2}}} \quad \text{(I.30)}$$

I.5.6.3. Masse volumique (ρ)

La détermination de la masse volumique d'un nano fluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique **Ø** à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left[\frac{m}{V}\right]_{nf} = \frac{mf + ms}{Vf + Vs} = \frac{\rho f Vf + \rho s Vs}{Vf + Vs} \quad \text{(I.31)}$$

La fraction volumique des nanoparticules, ø désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide+solide)

$$\emptyset = \frac{\text{Volume du solide}}{\text{volume total du nanofluide}} \quad \text{(I.32)}$$

En déduire alors la masse volumique du nano fluide :

$$\rho_{nf} = (1-ø)\,\rho_f + ø\rho_s \quad \text{(I .33)}$$

Où :

ρ_{nf} : la masse volumique du nano fluide

ρ_f : la masse volumique de fluide

ρ_s : la masse volumique de solide

I.5.6.4.Conductivi té thermique(k)

La conductivité thermique ou conductibilité thermique notée **λ** ou K en (W/m. K), est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 Kelvin ou 1degré Celsius par mètre.

Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions.

Nous présentons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nano fluides.

A. Modèle de maxwell (1873)

Maxwell fait le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules.

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante : [32]

$$k_{nf}=\frac{k_p+2k_{bf}-2\emptyset(k_{bf}-k_p)}{k_p+2k_{bf}+\emptyset(k_{bf}-k_p)}k_{bf} \qquad \text{(I.34)}$$

Où :

K_{nf} : la conductivité thermique du nano fluide [W .m^{-1}. K^{-1}]

K_{bf} : la conductivité thermique du fluide de base [W. m^{-1}. K^{-1}]

K_p : la conductivité thermique des particules [W. m^{-1}. K^{-1}]

$\emptyset$: la fraction volumique des nanoparticules

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

B. Modèle de Hamilton et Crosser (1962)

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite du modèle de Maxwell.

Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques, pour cela le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité

Thermique du nano fluide quel que soit la forme de la nanoparticule, en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité(ψ). Ce facteur est nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

Dans ce modèle, la conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [33]

$$k_{nf}=\frac{k_p+(n-1)k_{bf}-(n-1)(k_{bf}k_p)\emptyset}{k_p+(n-1)k_{bf}+(k_{bf}-k_p)^{\theta}}k_{bf} \qquad (I.35)$$

n : est un facteur de forme empirique donné : $n=\frac{3}{\psi}$

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.

I.5.6.5.Chaleur spécifique (C_P)

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $c_{p=}\frac{dQ}{mdt}$ (I.36).la chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide, on peut citer les deux modèles suivants :

A. **Modèle du Pak et Cho** [34]

Pak et cho ont utilisé la formule suivante :

$$(C_P)_{nf} == (1-\emptyset)(C_p)_{bf} + \emptyset (C_P)_p \qquad (I.37)$$

B. **Modèle de Xuan et Roetzel** [35]

Xuan et Roetzel ont travaillé avec la formule ci- dessous :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\emptyset)(\rho c_p)_{bf} + \emptyset (\rho c_p)_p \qquad (I.38)$$

(C_P), (C_p) $_{bf}$, (C_P) p, désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano fluide, du fluide de base et de nanoparticules.

I.5.6.6.Coefficient d'expansion volumique (β) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nano fluides, de très nombreux auteur on utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano fluide et par analogie avec la relation(I.39), on déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1-\varphi)\ \beta_{f} + \varphi\beta_{s} \qquad \text{(I.39)}$$

Où :

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

β_{f} : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_{s} : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

I.6.7. Les avantages de nano fluides :

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- 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. [28]

I.5.8. Les inconvénients du nano fluides :

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- Mauvaise caractérisation des suspensions.
- Stabilité des nanoparticules dispersion.
- Chute de pression accrue et la puissance de pompage.

I.6. Synthèse bibliographique :

Nous présentons dans cette partie les quelques travaux existant dans l'étude de transfert de chaleur et de masse dans un preux saturé par nanofluide, ainsi qu'en présence d'un milieu

poreux et nanofluide. Nous allons, dabs ce qui suit, faire une synthèse des démarches adoptées ainsi que des résultats plus parlants qui ont été dégagés :

Pei-Xue Jaing et al [36] ont étudié expérimentalement le transfert thermique par convection forcée dans un canal plan rempli de verre, de particules sphériques d'acier inoxydable ou de bronze. La section d'essai était de (58x80x5 mm) avec l'eau comme un fluide de fonctionnement. La distribution de la température locale de la paroi a été mesurée par les températures et la pression du fluide d'entrée et de sortie. Les milieux poreux ont considérablement augmentés le coefficient de transfert thermique bien que la résistance hydraulique a été augmentée encore d'avantage. Les effets du diamètre des particules, de la conductivité thermique de la phase solide et de la vitesse du fluide ont été examinés pour la gamme de conductivité thermique (de 75.3 W/m. k pour le bronze à 0.744 W/m. K pour le verre) et pour trois tailles nominales de la particule (0.278 ,0.428 et 0.7mm). Le débit d'eau réfrigérant dans le canal est de 0.01568 à 0.1992Kg /s. Le coefficient du transfert thermique et le nombre de Nusselt sont augmentés avec la diminution du diamètre de la particule de bronze, mais diminue avec la diminution du diamètre de la particule de verre. Ils augmentent également avec l'augmentation de la conductivité thermique de la particule solide.

SALHI Hicham. [37] présente une étude numérique de la convection naturelle laminaire Stationnaire dans une enceinte carrée chauffée et remplie d'un mélange d'eau et des nanofluides. Pour différentes positions de source de chaleur et différentes fractions volumiques pour les nanofluide. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la Méthode des volumes finis par l'utilisation d'un schéma hybride. Les champs thermiques et Dynamique ont été obtenus ainsi que le nombre de Nusselt.
La procédure de simulation a été validée par comparaison des résultats obtenus avec ceux D'autres travaux. L'influence des paramètres (nombre de Rayleigh, type de nanofluide, la Position des sources de chaleur) a été considérée. Des corrélations entre le nombre de Nusselt Et les différents paramètres de contrôle de la configuration en question ont été également Obtenues.

A.M. Rashad, M.A. EL-Hakiem, M. M. Abdou : ont étudié l'effet de la vitesse de filtration uniforme sur la convection libre dans la couche limite d'un fluide non newtonien sur un cône vertical perméable immergé dans un milieu poreux saturé d'un nanofluide. Le modèle utilisé pour la nanofluide comporte les effets du mouvement Brownien et thermophorése. Les équations aux dérivées partielles régissant sont transformées en un ensemble d'équations non

similaires et résolues numériquement par une méthode itérative, méthode des différences finies implicite. Les comparaisons avec les travaux déjà publiés sont effectuées et excellent accord est obtenu. Une étude paramétrique des paramètres physiques est effectuée et un ensemble représentatif des résultats numériques pour la vitesse, la température et les profils de fraction de volume, ainsi que les nombres de Nusselt et de Sherwood locales est illustrée graphiquement pour montrer des caractéristiques intéressantes des solutions **[38].**

M. Mahmoudi : a présenté une étude d'un écoulement d'un nanofluide en convection Naturelle pour différents types de nanofluides à base d'eau, dans une cavité carrée qui contient un chauffage mince à l'intérieur. Les parois gauche et droite de la cavité sont maintenues à une température constante Tc, tandis que ses parois supérieures et inférieures sont séparées. Un chauffage avec la température de Th (Th > Tc) est localisé à l'intérieur de la cavité avec une longueur varie. Les équations gouvernantes utilisent la méthode du volume finis avec l'algorithme de simpler. Il a été observé à partir des résultats numériques que, pour des faibles valeurs de nombre de Rayleigh avec une position horizontale, le taux de transfert thermique est plus important par rapport à la position verticale. En outre, il a été constaté que, à un grand nombre de Rayleigh, le nanofluide Ag-eau est plus efficace pour améliorer le taux de transfert de chaleur **[39].**

R. Abdul-Kahar, R.K. Muhaimin [40] : ont étudié numériquement un écoulement de couche limite d'un nanofluide qui passe par une surface poreuse verticale en présence d'une réaction chimique et rayonnement thermique. Le modèle utilisé pour le nanofluide incorpore les effets du mouvement Brownien avec la thermophorése en présence de conditions aux limites variables. Ils ont constaté que, la présence de nanoparticules en termes de la thermophorése et du mouvement Brownien joue un rôle important pour modifier le transfert thermique.

P. Rana. R. Bhargava, O. A. Bég [41] : ont étudié un écoulement type couche limite en convection mixte pour un nanofluide incompressible devant une plaque inclinée immergée dans un milieu poreux saturé les équations non linéaires résultantes avec des conditions aux limites associées sont résolues à l'aide d'une méthode des éléments finis (FEM).

D. Srinivasacharya, O. Surender [42] : ont étudié les effets de stratification thermique et de la masse sur la couche limite en convection naturelle devant une plaque verticale immergée dans un milieu poreux saturé d'un nanofluide la température, la concentration et la fraction volumique de nanoparticule à la plaque sont maintenus uniformes et constantes. Le modèle utilisé pour nanofluides comporte les effets du mouvement Brownian et le thesmophore. Le

système d'équations différentielles partielles non linéaires est résolu à l'aide de la méthode de Killer-box. Ils ont démontré l'influence de paramètres de contrôles sur l'écoulement, le transfert thermique et massique.

N. Belghar, S. Lebbihi [43], ont mené une étude numérique de la convection naturelle dans une enceinte carrée chauffée et remplie d'un nano fluide (Cu/eau). Ils ont utilisé la simulation numérique comme outil de calcul. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis. Une étude paramétrique a été montrée en considérant la concentration de nano fluide, le nombre de Rayleigh.

A. Daas, S. Derfouf, N. Belghar [44], ont fait une étude numérique de la convection libre dans une géométrie rectangulaire remplie d'un nano fluide (Cu/eau) est chauffée par une source thermique. Les équations de continuité, masse et d'énergie sont discrétisées par la méthode numérique des volumes finies, ont utilisé la simulation numérique comme un outil d'investigation.

Les résultats obtenus analysent les champs thermiques, en examinant le nombre de Nusselt qui compare l'effet de la convection par rapport à la conduction.

Boulahia Zoubaire, Wakif Abderrahim [45], ont atteint à travers cette étude numérique sur la convection naturelle des nano fluide (Cu/eau), pour transférer la chaleur dans un récipient carré équipé de blocs de refroidissement pour refroidir les composants électroniques, les échangeurs de chaleur. L'effet de la hauteur du corps froide sur l'eau pure et les nano fluide (Cu/eau) était connu par simulation numérique, ou le nombre de Rayleigh et la fraction de nanoparticules sont différents.

k. Najid, F. Dahami, Z. Boulahia et R. Sehaqui [46], ont présenté une étude numérique de la convection naturelle dans une paroi ondulée remplie de nano fluide (Cu/eau). La simulation numérique a été utilisée pour concevoir le code et le signal. Ils ont discrétisé les équations de décision par méthode SOR et ADI. Une étude paramétrique a été réalisée en considérant le type de nano fluides, l'amplitude d'ondulation et le nombre de Rayleigh.

Les résultats ont été analysés en prenant en compte le nombre de Nusselt au travers de champs dynamique et thermique.

KROUMA Saadia, N.BELGHAR [47], ont atteint à travers cette étude numérique ont permis d'analyser en détail des échanges thermiques par des nanofluides afin de comprendre et de valoriser les différents mécanismes qui avèrent conditionner leurs propriétés thermo-

physiques ainsi que leurs améliorations thermiques au sein d'un micro-échangeur de chaleur destiné au refroidissement des composants électroniques.

I.7.Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une revue sur les différents modes de transfert de chaleur ainsi transfert de masse et propriétés thermo physique de milieux poreuse aussi le modèle d'écoulement et une étude détaillée sur les nanofluides utilisés au cours de cette décennie, leurs propriétés physiques et leur application dans de nombreux problème.

Chapitre II

Modèle Physique

Et

Formulation Mathématique

Modèle physique et formulation Mathématique

II.1. Introduction

Le transfert de chaleur dans un nanofluide dépend à la fois des propriétés thermo physiques de la phase solide et de la phase liquide. Le modèle physique et mathématique, ont été élaborés pour l'étude des transferts thermiques dans les nanofluides. Dans la présente étude, nous sommes particulièrement intéressés par les calculs du taux de transfert de chaleur et de masse à une position donnée et les quantités physiques d'intérêt sont les nombres locaux de Nusselt et le Nusselt moyen.

II.2Description du problème

Cu-eau nanofluide

Nous proposons d'étudier le phénomène de convection naturelle du nanofluide Cu-Eau dans un espace confiné. Le diagramme schématique du milieu poreux bidimensionnel considéré dans cette étude est illustré à la figure II.1, où la longueur, la hauteur et la largeur de la cavité sont désignées par L, H et W, respectivement. La cavité est délimitée par deux parois isothermes, la paroi chaude est maintenue à la température T_h et la paroi refroidie à la température $T_{C,}$ tandis que les deux autres parois sont adiabatiques. Les X et Y sont les coordonnées cartésiennes et Y est l'angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal.

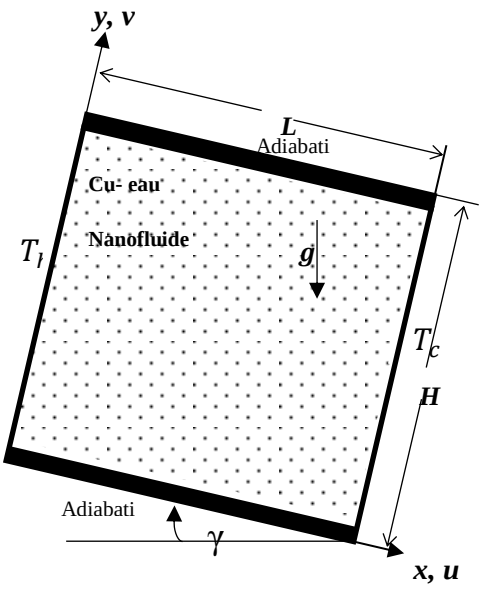


Figure .II.1 : Représentation schématique du modèle physique et du système de coordonnées.

II.3 Simplifier les hypothèses

Au cours de notre étude, plusieurs approximations ont été adoptées afin de simplifier la formulation du modèle mathématique :

• La largeur de la cavité, W, est supposée suffisamment grande par rapport aux autres dimensions (W / L et W / H >> 1) pour que les effets tridimensionnels deviennent négligeables. Cela nous amène alors à un problème à deux dimensions comme le montre la figure. II.1.

• La solution est un fluide newtonien et incompressible.

• Le flux généré est supposé être laminaire.

• La matrice poreuse est isotrope, perméable et homogène.

• Il n'y a pas de réaction chimique ni de source de chaleur ou de masse. Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

• Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.

• Les nanoparticules ont une forme sphérique

• Un équilibre thermique entre le fluide de base et les nanoparticules sphériques solides

• Une homogénéité et un équilibre thermique local dans le milieu poreux.

• Le nanofluide, est simulé comme un fluide monophasé

• Les propriétés thermo physiques du nanofluide sont constantes et évaluées à la température de référence. Cependant, la densité du fluide en termes de forces volumiques varie linéairement avec la température. Ceci est donné par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \rho_{nf,0}\left[1-(\beta_T)_{nf}(T-T_0)\right] \qquad \text{(II.1)}$$

Où : T représente la température en un point, T_0 et $\rho_{nf,0}$ représentent respectivement la température et la densité de référence, $(\beta_T)_{nf}$ est le coefficient de dilatation thermique du nanofluide :

II.4 Formulation mathématique :

Compte tenu de toutes les hypothèses considérées, le système d'équations différentielles décrivant ce problème est composé de l'équation de continuité, des équations de conservation de la quantité de mouvement et des équations de conservation de l'énergie en milieu poreux.

Le modèle ainsi formé est connu sous le nom de loi Darcy.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0\ ; \tag{II.2}$$

$$\frac{\mu_{nf}}{K}u=-\frac{\partial p}{\partial x}-\rho_{nf}\,g\,\sin\,\Phi \tag{II.3}$$

$$\frac{\mu_{nf}}{K}v=-\frac{\partial p}{\partial x}-\rho_{nf}\,g\,\cos\,\Phi \tag{II.4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+u\,\frac{\partial T}{\partial x}+v\,\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_{mnf}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)\ ; \tag{II.5}$$

$$\varepsilon'\frac{\partial S}{\partial \tau}+u\,\frac{\partial S}{\partial x}+u\,\frac{\partial S}{\partial y}=D\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right) \tag{II.6}$$

Après avoir éliminé le terme de pression des équations de quantité de mouvement et utilisé l'approximation de Boussinesq pour décrire la variation de densité de la force de flottabilité.

Les équations gouvernantes peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}=-\frac{gK\,\rho_{nf}}{\mu_{nf}}\left\{\beta_{Tnf}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\cos\,\Phi-\frac{\partial T}{\partial y}\sin\,\Phi\right)+\beta_S\left(\frac{\partial T}{\partial x}\cos\,\Phi-\frac{\partial T}{\partial y}\sin\,\Phi\right)\right\} \tag{II.7}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+u\,\frac{\partial T}{\partial x}+v\,\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_{mnf}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{II.8}$$

$$\varepsilon'\frac{\partial S}{\partial \tau}+u\,\frac{\partial S}{\partial x}+u\,\frac{\partial S}{\partial y}=D\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right) \tag{II.9}$$

Les propriétés physiques du nanofluide: densité ρ_{nf}, viscosité μ_{nf}, capacité thermique $(\rho C_p)_{nf}$, conductivité thermique K_{nf} et coefficient de flottabilité $(\rho\beta_T)_{nf}$ sont données par

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p,\ \mu_{nf} = \mu_f \Big/ (1-\phi)^{2.5},\ (\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p$$

$$K_{nf} = K_f \left[\frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \right],\ (\rho\beta_T)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta_T)_f + \phi(\rho\beta_T)_p \qquad \text{(II.10)}$$

Où ϕ est la fraction volumique des nanoparticules, et f se réfèrent respectivement au fluide et aux (nano) particules. Les propriétés thermophysiques des fluides (eau) et des nanoparticules (Cu) et la structure glissante du milieu poreux (mousse d'aluminium) sont rapportées par le tableau(II. 1).

Propriétés physique	**Fluide de base (eau)**	**Cu**	**Mousse d'aluminium**
$C_p\ (J.kg^{-1}.K^{-1})$	4179	385	897
$\rho\ (kg.m^{-3})$	997.1	8933	2700
$k\ (W.m^{-1}.K^{-1})$	0.613	400	205
$\alpha \times 10^{-7}\ (m^2.s^{-1})$	1.47	1163.1	846.4
$\beta \times 10^{-5}\ (K^{-1})$	21	1.67	2.22

Tableau. II.1 : Propriétés thermophysiques des fluides (eau) et des nanoparticules (Cu) et de la structure solide

Afin d'explorer l'effet de la conductivité thermique et de la porosité du milieu poreux à matrice solide, nous avons la capacité thermique globale par unité de volume $(\rho C_p)_m$ et la conductivité thermique globale pour le mode de conduction thermique k_m parallèle dans les phases solide et fluide qui sont données par Nield et Bejan (2017), Xu et al. (2019) :

$$(\rho Cp)_m = \varepsilon(\rho Cp)_f + (1-\varepsilon)(\rho Cp)_S \quad k_m = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_S \qquad \text{(II.11)}$$

Où et f se référer à la matrice solide du milieu poreux et des phases fluides. La conductivité thermique et la diffusivité thermique du milieu poreux saturé de nanofluide peuvent être évaluées en utilisant les propriétés thermophysiques des nanofluides

(TableauII. 1) comme suit :

$$(\rho Cp)_{mnf} = \varepsilon(\rho Cp)_{nf} + (1-\varepsilon)(\rho Cp)_S = (\rho Cp)_m \left[1 - \varepsilon\varphi \frac{(\rho Cp)_f - (\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_m}\right] \quad \text{(II.13)}$$

$$k_{mnf} = \varepsilon k_{nf} + (1-\varepsilon) k_S = k_m \left[1 - \frac{3\varepsilon\phi k_f (k_f - k_p)}{k_m \left[k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)\right]}\right] \quad \text{(II.14)}$$

$$\alpha_{mnf} = \frac{k_{mnf}}{(\rho Cp)_{nf}}, \ \alpha_m = \frac{k_m}{(\rho Cp)_f} \quad \text{(II.15)}$$

Où α est la diffusivité thermique, ε est la porosité du milieu poreux et des indices, *m*, *mnf*, et s sont liés au milieu poreux fluide saturé fluide, au milieu poreux saturé nanofluide et à la matrice solide du milieu poreux, respectivement.

En supposant que la cavité a une forme carrée $(L = H)$, et en prenant la vitesse est sans dimension par rapport à la diffusivité thermique. De plus, la température est sans dimension par rapport à la différence de température entre les deux parois horizontales de la cavité.

Les variables adimensionnelles sont données par :

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_{mnf}}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_{mnf}}, \quad t = \frac{\tau\alpha_{mnf}}{HL}, \theta_T = \frac{T - T_C}{\Delta T}, \theta_S = \frac{S - S_C}{\Delta S}$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\sigma} \quad \text{(II.16)}$$

De plus, la fonction de flux sans dimension Ψ est définie comme :

$$U = \frac{\partial\Psi}{\partial Y}, \ V = -\frac{\partial\Psi}{\partial X} \quad \text{(II.17)}$$

En introduisant les équations de propriétés thermophysiques des nanofluides, la conductivité thermique et la diffusivité des équations de milieu poreux saturé de nanofluides (II.14) et (II.15) et les variables sans dimension (II.16) et (I.17) dans les équations (II.2), (II.6), nous obtenons les équations gouvernantes sans dimension suivantes décrivant respectivement la conservation du mouvement et de l'énergie.

$$\nabla^2\Psi = -R_T.H(\phi)\left(\frac{\partial\theta_T}{\partial x}\cos\Phi - \frac{\partial\theta_T}{\partial y}\sin\Phi + \frac{\partial\theta_S}{\partial x}\cos\Phi - \frac{\partial\theta_S}{\partial y}\sin\Phi\right) \quad \text{(II.18)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial Y}\frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \psi}{\partial X}\frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \tag{II.19}$$

$$\varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + u\frac{\partial S}{\partial y} = Le^{-1}\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right) \tag{II.20}$$

Où les paramètres $F(\phi)$ et $H(\phi)$ l'équation de l'élan sont donnés par : terse R_T ,

$G = \frac{\tilde{K}\alpha_m}{\nu_f L}$ Est le paramètre d'effet inertiel (II.21)

$R_T = \frac{gKL\Delta T(\rho\beta_T)_f}{\mu_f \alpha_m}$ Est le nombre de Darcy-Rayleigh (II.22)

$$F(\phi) = (1-\phi)^{2.5}\left(1-\phi+\phi\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)\times\frac{\left[1-\frac{3\varepsilon\phi k_f(k_f-k_p)}{k_m\left[k_p+2k_f+\phi(k_f-k_p)\right]}\right]}{\left[1-\phi+\phi\frac{(\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_f}\right]} \tag{II.23}$$

$$H(\phi) = (1-\phi)^{2.5}\left(1-\phi+\phi\frac{(\rho\beta)_p}{(\rho\beta)_f}\right)\times\frac{\left[1-\phi+\phi\frac{(\rho Cp)_p}{(\rho Cp)_f}\right]}{\left[1-\frac{3\varepsilon\phi k_f(k_f-k_p)}{k_m\left[k_p+2k_f+\phi(k_f-k_p)\right]}\right]} \tag{II.24}$$

Les fonctions $F(\phi)$ et $H(\phi)$ dépendent de la structure solide du milieu poreux, des propriétés thermophysiques des nanofluides (fluide et nanoparticules) et de la concentration ϕ En nanoparticules Comme on peut le voir $\phi = 0$, $F(\phi) = H(\phi) = 1$ (fluide clair).

II .5Conditions aux limites :

II .5.1 Conditions aux limites hydrodynamiques :

Ces conditions expriment l'imperméabilité des parois de la cavité, elles sont données par :

$$\left.\begin{array}{l} \Psi = 0 \quad at \quad X = \pm \dfrac{1}{2} \\ \Psi = 0 \quad at \quad Y = \pm \dfrac{1}{2} \end{array}\right\} \qquad \text{(II.25)}$$

II .5.2 Conditions aux limites thermiques et solutale :

Les conditions aux limites sur les parois adiabatiques et imperméables de la cavité s'expriment par :

$$\left.\begin{array}{l} \theta_T = \theta_S = 0.5 \quad at \quad X = -\dfrac{1}{2} \\ \theta_T = \theta_S = -0.5 \quad at \quad X = \dfrac{1}{2} \\ \dfrac{\partial \theta_T}{\partial Y} = \dfrac{\partial \theta_S}{\partial Y} \quad at \quad Y = \pm \dfrac{1}{2} \end{array}\right\} \qquad \text{(II.26)}$$

II .6 Transfert de chaleur et transfert de masse :

Dans la présente étude, nous sommes particulièrement intéressés par les calculs du taux de transfert de chaleur et de masse à une position donnée, les quantités physiques d'intérêt sont les nombres locaux de Nusselt (le Sherwood local) $Nu\ (Sh)$ et le Nusselt moyen (Sherwood) les nombres $Nu_m\ (Sh_m)$ aux parois verticales, qui sont définis comme :

$$Nu = -\frac{k_{mnf}}{k_f}\left(\frac{\partial \theta_T}{\partial X}\right)_{X=\pm 0.5} \quad \text{et} \quad Sh = -\left(\frac{\partial \theta_S}{\partial X}\right)_{X=\pm 0.5} \qquad \text{(II.27)}$$

$$Nu_m = \int_{-1/2}^{+1/2} Nu\, dY \quad \text{et} \quad Sh_m = \int_{-1/2}^{+1/2} Sh\, dY \qquad \text{(Il.28)}$$

I.7.Conclusion

Dans cette étude nous sommes intéressés par Description du problème et Simplifier les hypothèses et mis la Formulation mathématique avec les Conditions aux limites hydrodynamiques et les Conditions thermiques et soluto-frontières. Ensuite, nous avons calculé du taux de transfert de chaleur et de masse à une position donnée.

Chapitre III

Différences finies

Différences finies

III.1Introduction :

Les équations régissant le phénomène de la convection naturelle sont des équations aux dérivées partielles. Leur résolution analytique est pratiquement impossible du fait de la non linéarité enregistré sur leurs termes convectifs ainsi que le couplage vitesse-pression dans l'équation de la quantité de mouvement. Néanmoins, un recours aux méthodes de résolution numériques s'avère nécessaire pour les résoudre. Il existe dans la littérature, plusieurs méthodes pour résoudre ce type d'équations, à savoir :

- La méthode des différences finies
- La méthode des éléments finis
- La méthode des volumes finis

III.2Méthode des différences finis :

III.2.1 Définition de la méthode des différences finies :

La méthode des différences finies est une technique courante de recherche de solution s'approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.

III.2.1.1 Maillage

Un maillage est un ensemble de points isolés (nœuds) situées dans le domaine de définition ou en veut résoudre notre EDP.

Le maillage comprend aussi les nœuds situés sur la frontière du domaine pour pouvoir imposer les conditions aux limites et les conditions initiales.

III.2.1.2 Pas de maillage :

On n'appelle pas de maillage la distance entre deux nœuds voisins situes sur une droite parallèle à l'un des axes

Dans la pratique le pas est constant, mais des fois il impératif d'introduire un pas variable.

✓ **Exemples de maillage**

- Cas d'un EDO dont le domaine d'étude est l'intervalle [0,1] un maillage n'a pas constant est caractérises par les n+1 points ou nœuds, $x_i = ih, 0 \leq i \leq n$ et le pas $h = \frac{1}{n}$. Les deux points de frontière sont $x_0 = 0\ et\ x_n = 1$ on partit du maillage.

- Cas d'une EDP définie sur un domaine $\Omega = [0,1] \times [0,1]$.

  Les nœuds sont définis pour (x_i, y_i)=$\left(ih_x, ih_y\right), h_x = \frac{1}{n}\ et\ h_y = \frac{1}{m}$.

III.2.2. Principe général de la méthode et ordre de précision :

Cette méthode consiste à approximer les dérivées des équations au moyen des développements de Taylor. Elle est due aux travaux de plusieurs mathématiciens du 18ème siècle (Euler, Taylor, Leibniz, …).

Le principe général de la méthode est basé sur la formule de Taylor. La définition de la dérivée donne

$$\lim_{x \to x_0} \frac{u(x,t) - u(x_0,t)}{x - x_0} = \frac{\partial u}{\partial x}(x_0,t) = u'(x_0,t)$$

On pose $x - x_0 = h$, donc on a

$$\frac{u(x_0 + h, t) - u(x_0,t)}{h} \approx u'(x_0,t)$$

En appliquant la formule de Taylor au voisinage de x, on obtient

$$u(x + h, t) = u(x) + hu'(x) + \frac{h^2}{2!}u''(x) + \frac{h^3}{3!}(x) + \cdots$$

En tronquant la série au premier ordre en h, on obtient

$$\frac{u(x + h, t) - u(x)}{h} = u'(x) + O(h)$$

Qui est une approximation de dérivée $\frac{\partial u}{\partial x}$ d'ordre 1.

La puissance de h avec laquelle l'erreur de troncature vers zéro est appelée l'ordre de schéma.

Notation .1 on pose

$$u(x,t) = u_i, u(x+h,t) = u_{i+1}, u(x-h,t) = u_{i-1}, u'(x,t) = u_i'$$

Si $u : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ est une fonction appartenant à C^∞, on a

$$u_{i+1} = u_i + hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' + \frac{h^3}{3!}u_i^{(3)} + \frac{h^4}{4!}u_i^{(4)} + \cdots \quad \text{(III. 1)}$$

$$u_{i-1} = u_i - hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' + \frac{h^3}{3!}u_i^{(3)} + \frac{h^4}{4!}u_i^{(4)} + \cdots \quad \text{(III. 2)}$$

III.2.3.Schémas des différences finies approximant la première dérivée :

- **Schémas d'ordre 1 :**

En tronquant les deux séries (III.1) et (III.2) en premier ordre de h, on trouve

$$u_{i+1} = u_i + hu_i' + O(h^2) \quad \text{(III.3)}$$

$$u_{i-1} = u_i - hu_i' + O(h^2) \quad \text{(III.4)}$$

En tenant compte de la formule (III.3), on a

$$u_i' = \frac{u_{i+1}-u_i}{h} + O(h) \quad \text{(III.5)}$$

Cette formule est appelée schéma "avant" ou "décentré avant" aux différences finies d'ordre1 de u_i'.

De même, en utilisant la formule (III.4), on trouve

$$u_i' = \frac{u_i-u_{i-1}}{h} + O(h) \quad \text{(III.6)}$$

Cette formule est appelée schéma "arrière" ou "décentré arrière" aux différences finies d'ordre1 de u_i'.

Des deux formules (III.3) et (III.4), on obtient

$$u_{i+1} - u_{i-1} = 2hu_i' + O(h^2)$$

D'où

$$u_i' = \frac{u_{i+1}-u_{i-1}}{2h} + O(h) \quad \text{(III.7)}$$

Cette formule est appelée schéma "centré" d'ordre 1 de u_i'.

- **Schémas d'ordre supérieur :**

Des schémas aux différences finies d'ordre supérieur peuvent être construits en manipulant

Des développements de Taylor au voisinage de $x_i$et on écrit :

$$u_{i+1} = u_i + hu_i' + \frac{h^{(2)}}{2!}u_i'' + O(h^3) \quad \text{(III.8)}$$

$$u_{i-1} = u_i - hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' + O(h^3) \quad \text{(III.9)}$$

La soustraction des deux dernières équations donne

$$u_{i+1} - u_{i-1} = 2hu_i' + O(h^3)$$

Ce qui permet d'obtenir le schéma d'ordre deux dit "centré"

$$u_i' = \frac{u_{i+1}-u_{i-1}}{2h} + O(h^3) \quad \text{(III.10)}$$

Pour obtenir des ordres supérieurs, il suffit d'utiliser plusieurs nœuds voisins à x_i, par exemple, pour l'obtention d'un schéma aux différences finies d'ordre trois pour la dérivée première ; on pose

$$hu_i' = au_{i-1} + bu_i + cu_{i+1} + du_{i+2} \quad \text{(III.11)}$$

$$u_{i+1} = u_i + hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' + \frac{h^3}{3!}u_i^{(3)} + O(h^4) \quad \text{(III.12)}$$

$$u_{i-1} = u_i - hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' - \frac{h^3}{3!}u_i^3 + O(h^4) \quad \text{(III.13)}$$

$$u_{i+2} = u_i + (2h)u_i' + \frac{(2h)^2}{2!}u_i'' + \frac{(2h)^3}{3!}u_i^{(3)} + O(h^4) \quad \text{(III.14)}$$

En substituant (III.12), (III.13) et (III.14) dans la formule (II.11) on obtient

$$hu_i' = a\left(u_i - hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' - \frac{h^3}{3!}u_i^{(3)}\right) + bu_i + c\left(u_i + hu_i' + \frac{h^2}{2!}u_i'' + \frac{h^3}{3!}u_i^{(3)}\right)$$
$$+ d\left(u_i + (2h)u_i' + \frac{(2h)^2}{2!}u_i'' + \frac{(2h)^3}{3!}u_i^{(3)}\right) + O(h^4)$$

D'où

$$\mathrm{hu}_{\mathrm{i}}^{'} = (a+b+c+d)u_i + h(-a+c+2d)u_i^{'} + h^2\left(\frac{a}{2}+\frac{c}{2}+2d\right)u_i^{''} + h^3\left(-\frac{a}{6}+\frac{c}{6}+\frac{4d}{3}\right)u_i^3 \quad \text{(III.15)}$$

En identifiant les deux membres de (III.15), on trouve

$$\begin{cases} a+b+c+d=0 \\ -a+c+2d=1 \\ a+c+4d=0 \\ -a+c+8d=0 \end{cases}$$

En résolvant le système, on obtient

$$a=-\frac{1}{3}, b=-\frac{1}{2}, c=1, d=-\frac{1}{6}$$

$$u_i' = \frac{-2u_{i-1}-3u_i+6u_{i+1}-u_{i+2}}{6h} + O(h^3)$$

- Ce schéma est d'ordre 3.

III.2.4 Dérivées d'ordre supérieur :

Pour construire un schéma d'approximation de la dérivée seconde deui, le principe est le même et repose sur les développements de Taylor au voisinage dexi. L'addition de deux équations (III.12) et (III.13) donne

$$\mathrm{u}_{\mathrm{i+1}} + \mathrm{u}_{\mathrm{i-1}} = 2\mathrm{u}_{\mathrm{i}} + \mathrm{h}^2\mathrm{u}_{\mathrm{i}}^{(2)} + \mathrm{O}(\mathrm{h}^4)$$

On obtient un schéma approximant la dérivée seconde dit "centré" d'ordre deux

$$\mathrm{u}_{\mathrm{i}}'' = \frac{\mathrm{u}_{\mathrm{i+1}} - 2\mathrm{u}_{\mathrm{i}} + \mathrm{u}_{\mathrm{i-1}}}{\mathrm{h}^2} + \mathrm{O}(\mathrm{h}^2)$$

Il existe aussi une formulation "avant "et "arrière", toutes les deux d'ordre 1.

Schéma"avant :"

$$\mathrm{u}_{\mathrm{i}}'' = \frac{\mathrm{u}_{\mathrm{i+2}} - 2\mathrm{u}_{\mathrm{i+1}} + \mathrm{u}_{\mathrm{i}}}{\mathrm{h}^2} + \mathrm{O}(\mathrm{h})$$

Schéma"arrière ":

$$\mathrm{u}_{\mathrm{i}}'' = \frac{\mathrm{u}_{\mathrm{i}} - 2\mathrm{u}_{\mathrm{i-1}} + \mathrm{u}_{\mathrm{i-2}}}{\mathrm{h}^2} + \mathrm{O}(\mathrm{h})$$

Il est également possible de construire, par le même procédé, des schémas aux différences finies d'ordre supérieur pour les dérivées troisième, quatrième, etc.

La méthode des différences finies est plus efficace dans le domaine car :

- Elle a une grande simplicité d'écriture par rapport à la méthode des éléments finis (complexité de mise en œuvre).
- Un faible cout de calcul (grand coût en temps de calcul et mémoire pour les éléments finis).
- Résultats de convergence satisfaisante par rapport à la méthode des volumes finis (peu de résultats de convergence).

III.2.5. Analyse de l'approximation :

a. Erreur de troncature.

L'erreur de troncature vient du fait qu'on a tronqué le développement en série de Taylor de la fonction f.

L'erreur de troncature par pas est la différence entre la valeur calculée et la valeur exacte, en supposant qu'au pas précédent la valeur calculée et la valeur exacte étaient identiques.

b. La consistance d'un schéma aux différences finies.

Nous n'aurons de chance d'obtenir la convergence du schéma que si nous approchons correctement le problème continu, c'est-à-dire si nous remplaçons les dérivées partielles par des différences finies effectivement. La « qualité » de cette consistance s'appelle la précision du schéma.

c. La stabilité.

Un schéma numérique est stable, si les erreurs de n'importe quelle origine n'augmentent pas à

chaque pas de temps de calcul. L'instabilité numérique peut avoir une cause d'origine physique ; c'est le cas lorsque le phénomène n'est pas correctement modélisé.

d. La convergence.

Un schéma est dit convergent quand la solution de l'équation aux différences se rapproche de la vraie solution de l'équation aux dérivées partielles ayant les mêmes conditions initiales et aux limites lorsque la dimension des mailles de discrétisation diminue. Généralement, un schéma consistant est stable et également convergent).

III.3 Méthode des Volumes Finis (MVF) :

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisant es sur chaque volume de contrôle, où les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle.

Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul.

III.4 Méthode des éléments finis (MEV) :

La méthode des éléments finis est la méthode la plus utilisée pour les études des structures à trois dimensions, car elle étend les possibilités des méthodes matricielles à un très vaste domaine d'application et permet donc l'analyse des structures complexes.

Le principe de cette méthode, consiste à subdiviser la structure étudiée en sous domaine, de forme relativement simple « éléments finis ». L'approximation de la solution concernera l'élément constitutif et non pas la structure totale[48][49].

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre L'objet de la méthode des déférences fines est l'obtention de solution approchée de problème aux dérivées partielles avec conditions aux limites et conditions initiales.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Résultats et Discussions

IV.1. Introduction :

Dans cette étude nous présentons un ensemble de résultats numériques auxquels ces explications physique sont apportées. Les simulations numérique couvrent une large gamme de paramètre dans le cas d'une cavité poreuse saturée par nanofluide, dont chaque couche est considérée homogène et isotrope .Dans ce chapitre on utilisée la méthode de déférence finies pour résoudre le problème

IV.2. Effet de Maillage

Les tailles de grille sont testées de 60 × 60 à 400 × 400. Le tableau IV.1 montre l'effet de la taille du maillage sur le nombre moyen de Nusselt des murs chauds et froids et la valeur de la fonction de courant. On constate que la grille 200 × 200 est suffisamment suffisante pour résoudre le système d'équations.

Tableau IV. 1 : Variations du nombre moyen de Nusselt de paroi chaude, de paroi froide et de la valeur de la fonction de courant avec différentes tailles de grille (Cu / eau nanofluide-Mousse d'aluminium en tant que matrice solide de milieu poreux RT = 1000, ø = 0,05, Φ = 0°)

Maillage	$\lvert\Psi\rvert_{max}$	$\overline{Nu}_L$	$\overline{Nu}_R$
60x60	18.539	816 .66	816 .66
100x100	18.637	845.40	845.40
150x150	18.683	852.66	852.66
200x200	18.702	853.42	853.42
250x250	18.711	852.75	852.75
300x300	18.717	851.81	851,81
400x400	18.722	850. 30	850. 30

IV. 3. Effet de la fraction volumique (pourcentage) des nanoparticules, ∅, sur la structure de l'écoulement :

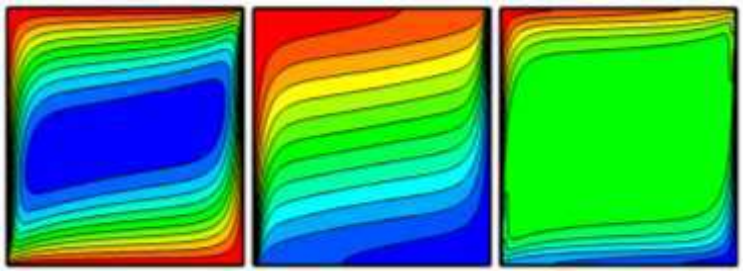
L'effet de la force du champ magnétique sur la convection à double diffusion dans une cavité carrée, A = 1, R_T = 200, Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° et différentes valeurs de fraction volumique de nanoparticules, ∅ = 0, 0,1, 0,2 et 0,3 sont illustrés dans les figures IV.1 (a) - (d) par les

lignes de courant, les isothermes et les isoconcentrations de gauche à droite, respectivement. Les résultats présentés sur la figure IV.2(a) sont obtenus pour ∅ = 0, c'est-à-dire en l'absence de nanoparticules (fluide pur). La structure d'écoulement se compose d'une cellule diagonale unicellulaire remplissant la cavité entière. Comme R_T est assez grand, la double convection diffusive est améliorée et les isothermes et les isoconcentrations sont plus déformées.

Les effets croissants de la fraction volumique sur la structure de l'écoulement dans la figure IV .1 (a) sont démontrés sur les figures IV.1 (b) et (c), pour ∅ = 0,1, 0,2 et 0,3, respectivement. Une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules réduit considérablement la force du mouvement convectif dans la couche comme l'indique la valeur de la fonction de courant au centre de la cavité : $|\Psi|_{max} = 6{,}640$ pour ∅ = 0,1, $|\Psi|_{max} = 4{,}353$ pour ∅ = 0,2 et $|\Psi|_{max} = 2{,}708$ pour ∅ = 0,3, les lignes d'isothermes et les isoconcentrations sont moins déformées, ce qui indique que le transfert de chaleur a tendance à être diffusif. Par conséquent, comme cela peut être observé sur les figures IV.1 (b)-(c), à la fois la température et les gradients de concentration sont considérablement inhibés avec une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Ψ T S

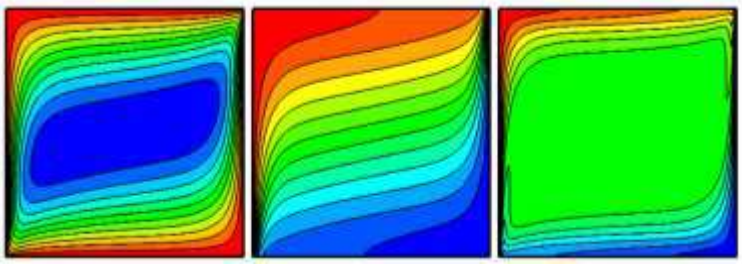
$ø = 0$



(a)

$|\Psi|_{max} = 9.813, Nu = 6.560, Sh = 24.848$

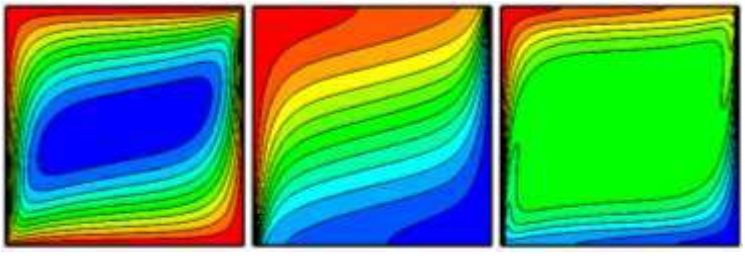
$ø = 0.1$



(b)

$|\Psi|_{max} = 6.640, Nu = 5.858, Sh = 18.221$

$ø = 0.2$



(c)

$|\Psi|_{max} = 4.353, Nu = 5.051, Sh = 12.794$

$\phi = 0.3$  (d)

$|\Psi|_{max} = 2.708, Nu = 4.343, Sh = 8.610$

Figure IV. 1. les lignes de courant (à gauche), isotherme (au milieu) isoconcentrations (à droite) pour A = 1, R_T = 200, Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° et différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules ϕ .

IV.4. Effet de la fraction volumique nanoparticules, ∅, sur les profils de fonction de courant, de la température et de la concentration :

La figure IV.2. Montre la solution numérique des profils de la fonction de courant, Ψ, de la température, T, et de la concentration, S, profils obtenus à mi-hauteur de cavité (c'est à dire y = 0, pour A = 1, R_T = 200, Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° et avec différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules, ∅, Ces profils montrent une tendance antisymétrique sur le plan mi-horizontal de la cavité. La figure IV.2 (a) montre que lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente, l'intensité de l'écoulement diminue et donc renforce la circulation de l'écoulement à l'intérieur de la cavité. Il a été observé que l'écoulement du fluide était amélioré sur les deux couches (séparées par la ligne horizontale à y = 0) et la vitesse est maximale sur les parois où le cisaillement est annulé. Cela découle également du fait que, selon ce modèle, le fluide peut glisser sur une frontière solide. Les profils De la fonction de courant, de la température et de la concentration obtenus pour ∅ = 0, sont ceux correspondant à un milieu poreux modélisé selon la loi de Darcy avec absence de nanoparticules. En augmentant la valeur de la fraction volumique des nanoparticules, on voit que la vitesse au voisinage des parois est considérablement réduite. L'effet de la fraction volumique des nanoparticules sur les profils de température est illustré sur la figure IV.2 (b).

On voit que, lorsque ∅ augmente, réduit l'intensité de la convection entraînant une augmentation de la température sur les parois verticales de sorte que le même flux de chaleur peut être maintenu à travers le système. En ce qui concerne les profils de la concentration, on

voit sur la figure IV.2 (c) que, dans le cas de la double convection diffusive, de manière similaire aux profils de température, la concentration près des parois solides est favorisée avec une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. L'influence de la fraction volumique des nanoparticules apparaît plus prononcée sur les profils de la température que sur les profils de la concentration.

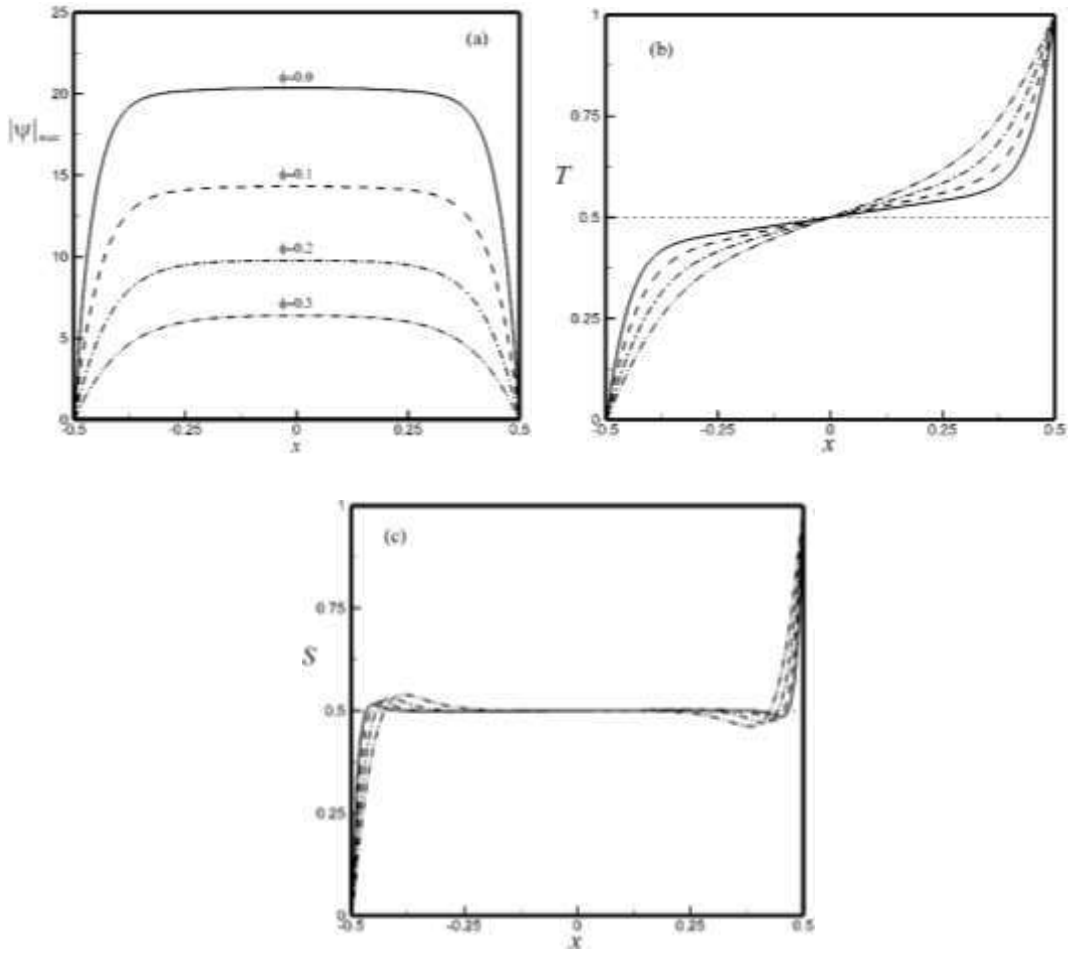


Figure IV.2. Les profils : (a) fonction de courant, | Ψ |, (b) température, T, (c) de la concentration, S, dans la mi-hauteur de la cavité pour A = 1, R_T = 200, Le = 10, N = 0, Φ = 0° et avec différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules, ϕ

IV.5. Effets de la fraction volumique nanoparticules, ∅, et le nombre de Rayleigh thermique,R_T, sur la fonction de courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood:

Afin de mettre l'accent sur l'effet du pourcentage de nanoparticules sur le transfert de chaleur des nanofluides saturés du milieu poreux, l'analyse précédente a été étendue pour

montrer la variation du l'écoulement, des champs thermiques et massique et sous l'effet du nombre de Rayleigh, R_T, qui est présenté dans la figure IV.3. La figure représente le comportement de la valeur absolue maximale de la fonction de courant et les nombres moyens de Nusselt et Sherwood en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs des fractions volumiques des nanoparticules, ϕ , Les résultats sont rapportés pour quatre pourcentages de nanoparticules ϕ = 0 (fluide pur), 0,1, 0,2 et 0,3. Comme on le voit, pour $R_T = 0$, le transfert de chaleur est le mode de conduction uniquement via le milieu poreux hautement conducteur (Nu_m = 1= 1 (∅ = 0), 1,2 (∅ = 0,1), 1,7 (∅ = 0,2), 2,2 (∅ = 0,3) et Sh_m= 1). Après cela, plus la valeur de R_T élevé, la valeur absolue de la fonction de courant et les valeurs moyennes des nombres de Nusselt et Sherwood augments, tandis que, pour un nombre de Rayleigh donné, le rendement des transferts de chaleur et de masse diminue avec l'augmentation du pourcentage de nanoparticules.

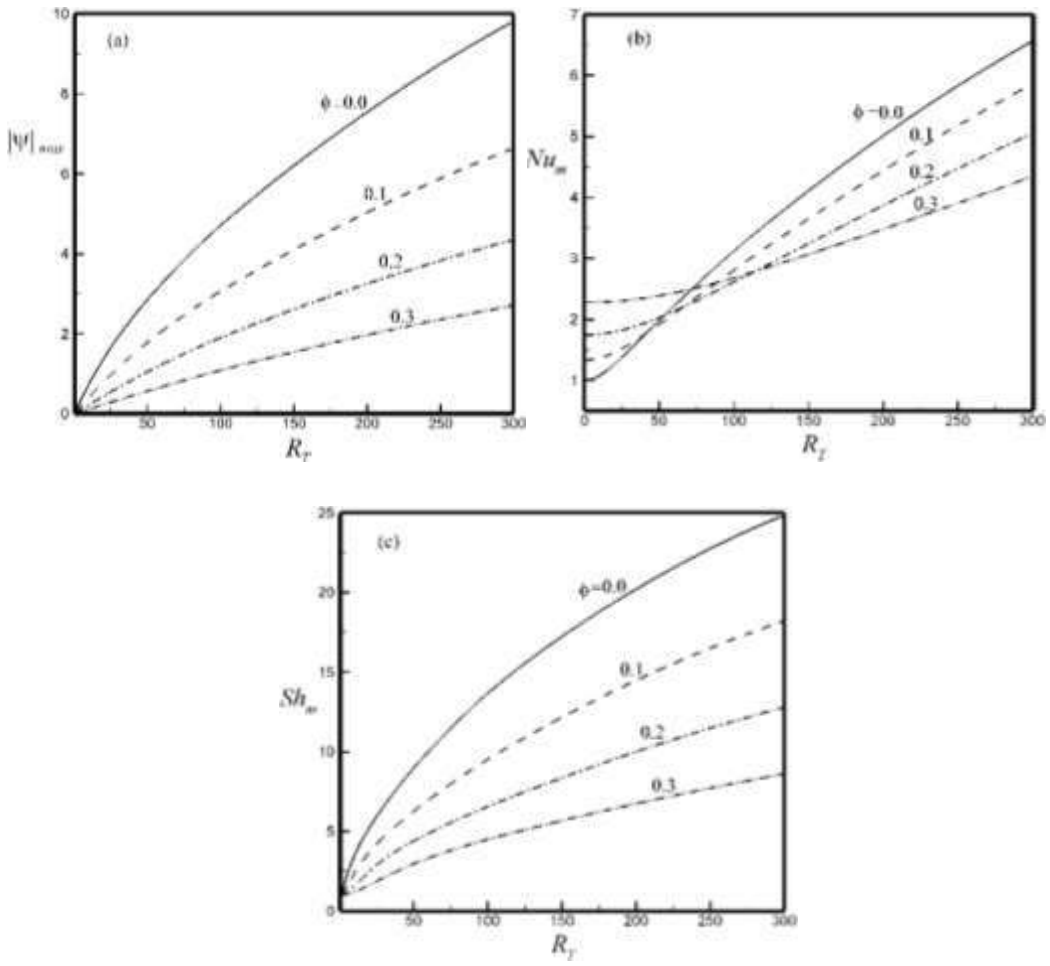


Figure. IV.3: Variation de (a) la fonction de courant, (b) le nombre moyen de Nusselt, (c) le nombre moyen de Sherwood gauche pour Le = 10, N = 0, Φ = 0 ° avec le nombre de Rayleigh, R_T et différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules, ϕ

IV.6. Effets de la fraction volumique nanoparticules, ∅, et de rapport des forces de volume, N, sur la fonction de courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood:

Les figures IV.4 (a)-(c) illustrent l'influence du taux de flottabilité, N, sur l'intensité de l'écoulement | Ψ |$_{max}$, les nombres moyens de Nusselt et Sherwood (Nu_metSh_m) pour R_T = 200, Le = 10, Φ = 0 ° et différentes valeurs de fraction volumique de nanoparticules, ϕ .Le taux de flottabilité, N, varie de -3 à 3. Cela couvre la plage allant d'un écoulement assisté à dominance solutale, N = 3, à un écoulement à dominante purement thermique, N = 0, à un écoulement opposé mais à dominance solutale N = -3. Lorsque N = 0 (c'est-à-dire, en l'absence d'effets de concentration), le mouvement convectif n'est induit que par une température constante, donnant lieu à une circulation thermique dans le sens antihoraire, (Ψ> 0), voir les lignes de courant sur la figure IV.5(a). Lorsque (N > 0) est au-dessus de zéro, les forces de flottabilité thermique et solutale s'opposent maintenant. Pour cette situation, la figure IV.4 (a) indique que le comportement d'écoulement dépend considérablement du fait que le taux de flottabilité soit inférieur ou supérieur à la valeur critique. N_{cr} = 1. Ainsi, pour N_{cr}= 1, les effets thermiques sont toujours prédominants tels que, | Ψ |$_{max}$ = 0, à condition que, N =N_{cr}. En dessous de cette valeurs, les résultants numériques convergent vers la partie inférieure avec une circulation de l'écoulement dans le sens des horaire (Ψ <0), voir les lignes de courant dans la figure IV.5 (b).

Pour les grandes valeurs positives de N, l'écoulement devient de plus en plus dominé par les forces de masse des espèces flottantes. Pour les grandes valeurs négatives de N, l'écoulement est à nouveau dominé par l'espèce de masse mais, comme N est négatif, la circulation du flux est maintenant dans le sens horaire (Ψ <0). Ainsi, comme illustré sur les Figure IV.4 (b) et (c), pour une valeur spécifique de ∅, les taux de transfert de chaleur et de masse (Nu_metSh_m) ont tendance à diminuer avec l'augmentation des valeurs de, N, pour N < N_{cr}, et augmenter avec l'augmentation des valeurs de, N, pour N >N_{cr}. Comme on peut l'observer sur les Figure IV.4 (b) et (c) lorsque N>N_{cr} (N <N_{cr}.), la composante diffusive la plus rapide est la chaleur et le transfert de masse est dominé par la convection. L'effet de l'augmentation de pourcentage de nanoparticule ∅ = 0 à 0,3 est représenté sur les Figure IV.4(a) et (b). À

première vue, les figures indiquent que pour une valeur donnée de la force de flottabilité, N, la force de la convection et du transfert de chaleur et de masse diminue continuellement avec une augmentation de∅.

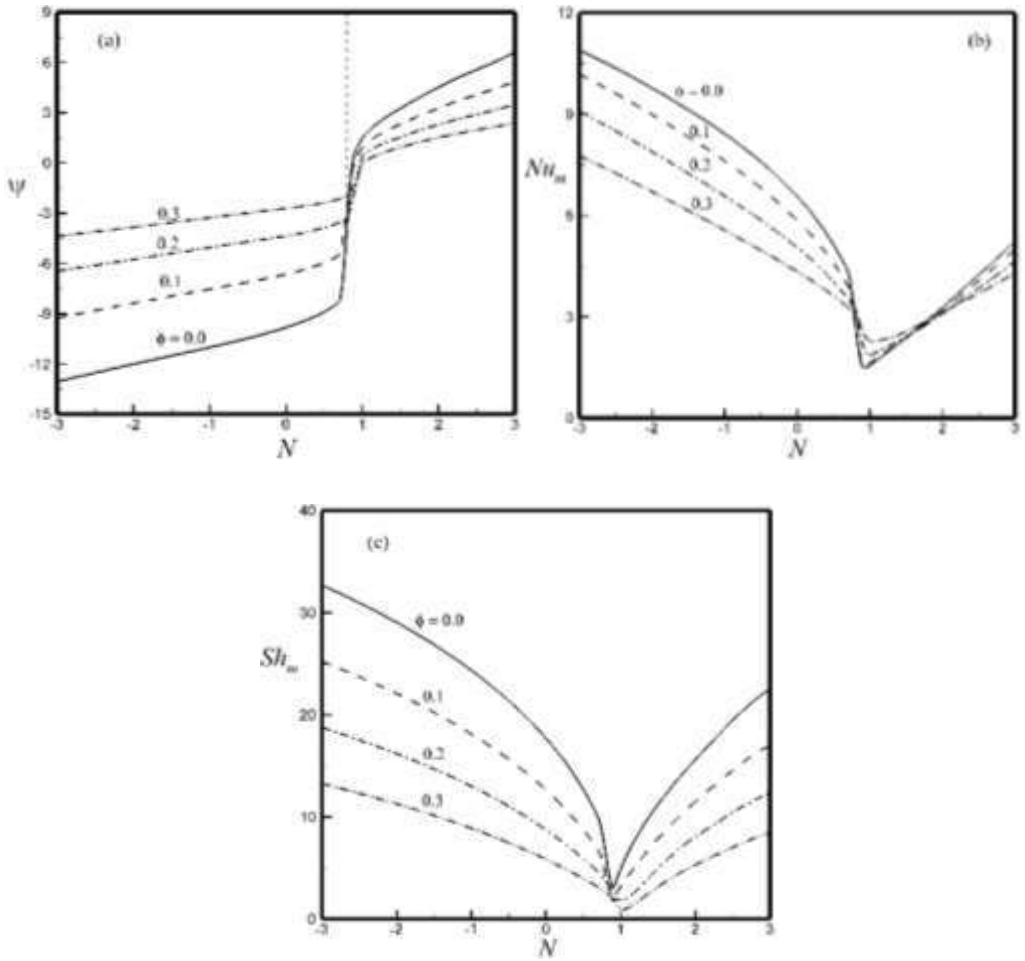
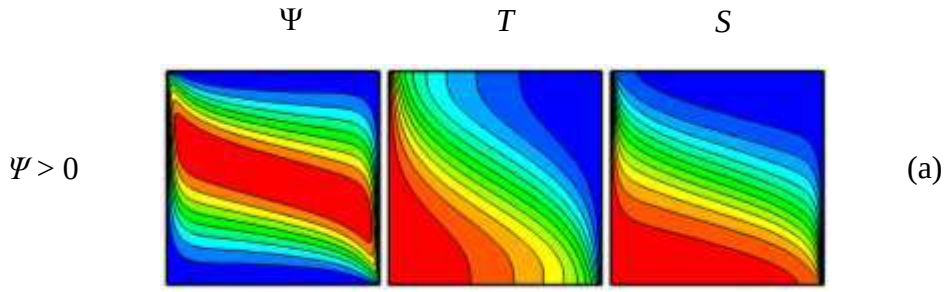


Figure IV.4 : Effets de la fraction volumique des nanoparticules, ∅, et de la force de Flottabilité, N, pour $R_T = 200$, Le = 10, Φ = 0 ° sur : (a) la fonction de courant, (b) le Nombre de Nusselt, et (c) le nombre de Sherwood.



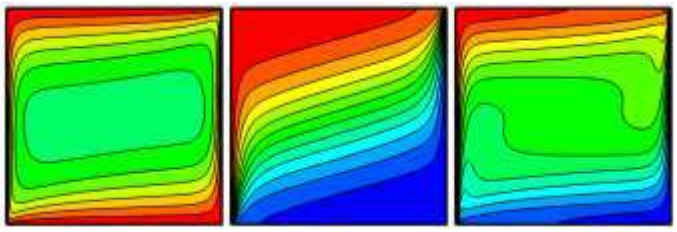
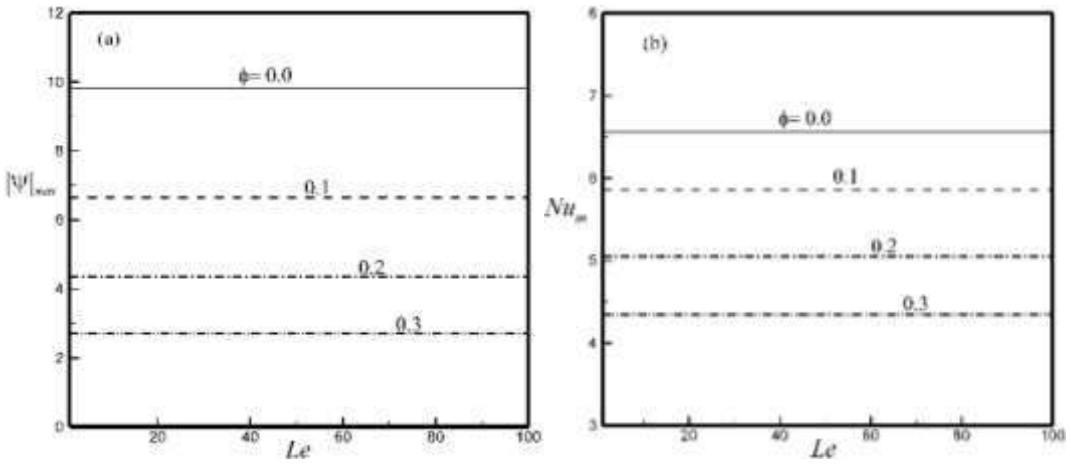
$\Psi < 0$  (b)

Figure .IV.5 : les lignes de courant, isotherme et isoconcentrations pour :(a) N=2 et N=-2

IV.7. Effets de la fraction volumique nanoparticules, ∅, et le nombre de Lewis,Le, sur la fonction de courant, le nombre de Nusselt et de Sherwood:

La figure IV.6.Illustre la variation de la fonction de courant, le nombre moyen de Nusselt, Nu_met le nombre moyen de Sherwood, Sh_m pour 5≤Le≤100 et pour la fraction volumique de nanoparticules, ∅ = 0, 01, 0,2 et 0,2 à l'angle d'inclinaison de Φ = 0 °. Ces chiffres démontrent que le nombre de Lewis n'a aucun effet sur la fonction de courant et le nombre moyen de Nusselt, mais a un effet significatif sur le nombre moyen de Sherwood. De plus, l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ∅ augmente légèrement la fonction de courant et le nombre de Nusselt moyen et améliore le transfert de chaleur. Ceci est dû à l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides due à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, qui a un effet sur la conductivité thermique globale de la cavité (nanofluide et matrice poreuse).



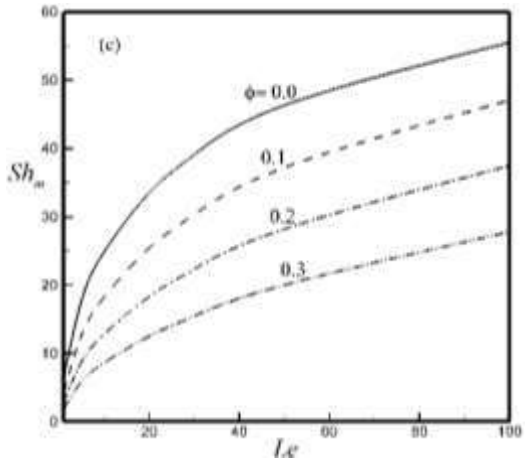


Figure IV.6 : Effets de la fraction volumique des nanoparticules, ϕ et du nombre de Lewis, Le, pour R_T = 200, N = 0, Φ = 0 ° sur : (a) la fonction de courant, (b) moyenne Nombre de Nusselt, Nu_m , et (c)) nombre moyen de Sherwood, Sh_m . L'effet de l'angle d'inclinaison de la cavité sur le champ d'écoulement et le champ thermique et massique pour un pourcentage de volume de nanoparticules donné est présenté dans la Figure. IV.7. Les figures n'illustrent clairement que l'angle d'inclinaison Φ à un effet dominant sur la force de convection et sur les taux de transfert thermique de masse massique.

Au fur de mesure que l'angle d'inclinaison Φ augmente de 0 ° à 180 °, les nombres moyens de Nusselt et Sherwood augmentent d'abord jusqu'à une valeur d'optimale (Φ= 60) pour une valeur de la fraction volumique de nanoparticules donnée, puis diminuent jusqu'à environ jusqu'à une valeur fixe qui représente la mode de transfert de chaleur par conduction pure. De plus, on constate que lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente, le nombre moyen de Nusselt et Sherwood diminue. Ce qui est notable, c'est lorsque l'angle d'inclinaison s'approche de la valeur de Φ = 90 °. La situation devient à mesure que la fraction volumique des nanoparticules augmente, les nombres moyens de Nusselt et Sherwood augmentent également. De plus, l'augmentation de la fraction volumiqueϕ des nanoparticules augmente légèrement le nombre moyen de Nusselt et Sherwood et améliore le transfert de chaleur (c'est-à-dire, $|\Psi|_{max} = 0$ et $Nu_m = Sh_m = 1$). Cela est dû à l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides due à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, qui a un effet sur la conductivité thermique globale de la cavité (nanofluide et matrice poreuse). De plus, avec la disparition de la convection sous cet angle de 180 °, l'effet de la viscosité dynamique a disparu, ce que nous avons vu précédemment son effet sur la

dégradation du transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ϕ

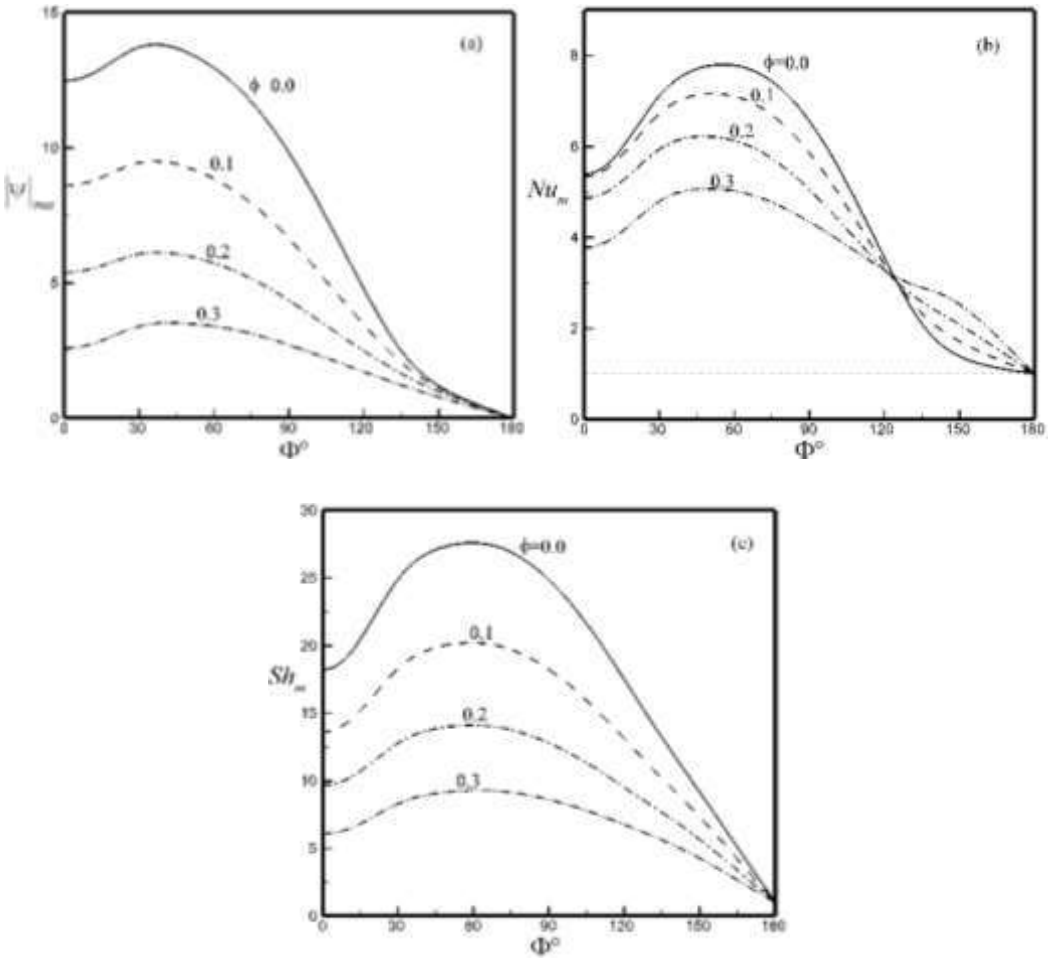


Figure. IV.7 : Dépendance de la fonction de courant (a) le nombre moyen de Nusselt (b) le nombre moyen de Sherwood (c) sur l'angle d'inclinaison Φ pour R_T = 200, Le = 10, N = 0 et différentes fractions volumiques de nanoparticulesØ.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Nous avons présenté dans cette mémoire une étude Numérique qui a permis d'apporter un certain nombre de résultants correspondant à une gamme de paramètres très variée. Les équations régissant le phénomène de la convection à double diffusion dans une cavité carrée sont résolues au moyen d'un calcul basé sur la méthode des différences finis. après l'étude qui testé l'effet de la fraction volumique nanoparticule sur les profils de fonction de courant, de la température et de la concentration et aussi Effets de la fraction volumique nanoparticules, ∅, et le nombre de Rayleigh thermique ,R_T, et de rapport des forces de volume, N, et le nombre de Lewis, Le, sur la fonction de courant, et le nombre de Nusselt et de Sherwood, et effet de l'angle d'inclinaison sur la force de convection et la chaleur et les taux de transfert de masse.

Les résultats montrent que : Une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules réduit considérablement la force du mouvement convectif dans la couche, et l'intensité de l'écoulement diminue et donc renforce la circulation de l'écoulement à l'intérieur de la cavité. Plus la valeur absolue maximale de la fonction de flux et les valeurs moyennes de Nusselt et Sherwood pour un nombre de Rayleigh donné sont élevées, plus le rendement de transfert de chaleur diminue avec l'augmentation du pourcentage de nanoparticules.

De plus, il est clair que le taux décroissant augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. Comportement d'écoulement dépend considérablement du fait que le taux de flottabilité soit inférieur ou supérieur à la valeur critique. Et la force de la convection et du transfert de chaleur et de masse diminue continuellement avec une augmentation de ∅. Chiffres démontrent que le nombre de Lewis n'a aucun effet sur la fonction de flux absolu maximum et le nombre moyen de Nusselt, mais a un effet significatif sur le nombre moyen de Sherwood. De plus, l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules augmente légèrement la fonction de flux absolu maximum et le nombre de Nusselt moyen et améliore le transfert de chaleur. Ceci est dû à l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides due à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, qui a un effet sur la conductivité thermique globale de la cavité. Au fur et à mesure que l'angle d'inclinaison Φ augmente les nombres moyens de Nusselt et Sherwood augmentent jusqu'à une valeur optimale. De plus, on constate que lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente, le nombre moyen de Nusselt et Sherwood diminue.

Conclusion générale

Finalement, Ce travail a permis d'apporter un certain nombre de résultats correspondant à une gamme de paramètres très variée. Ces résultats aideront sans doute à mieux comprendre les phénoménes des écoulements dus à la convection double diffusive dans les milieux poreux multicouches. En perspective nous analyserons des cas avec d'autres conditions aux limites et nous traiterons des problèmes de convection double diffusion en 2D.

Référence Bibliographique

[1] LELEU René, Transfert de chaleur, Dossier technique de l'ingénieur, j1080, 1992.

[2] S.SADDAM, Amelioration de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur à ailettes elliptique ceruse. Thése de master université de M'sila.2015

[3] Salma Halelfadl, 'Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nano fluides à base de nanotubes de carbone'. Génie mécanique [physics.class-ph]. INSA de Rennes, 2014. Français

[4] Diane DUVAL, Ailettes thermique, Institut National Des Sciences Appliquées de Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur ,2013

[5] ADRIAN BEJAN, ALLAND.KRAUS,"Heat transfer Handbook", TJ250.B35.2003

[6] ROBERT S. B., HARRY C. H., " Transport Phenomena", International Edition, 2003.

[7] LIENI IARD J. II. , "A Heat Transfer Text book", Third Edition, 2003

[8] JEAN TAINE., " Transferts couples dans les fluides ", Editions DUNOD, Paris 2003.

[9] JEAN T., JEAN P., " Transferts Thermiques et Massiques ", Editions DUNOD, Paris 2004.

[10] ISMAIL T., Modellinge in transport Phenomena", 2002 Elsevier science B.V

[11] Zhongda ZHANG, Gestion thermique des composants d'électronique de puissance - Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.

[12] M.A. BOUTRA, Notions des Phénoménes de transfert, livre d'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2016.2017.

[13] HANDBOOCK OF POROUSE MEDIA, second edition. Edited by kambiz vafai.

2005 by Taylor & Francis Group, LLC.

[14] S. BORIES, A. MOJTABI, M. PRAT, M.QUINTARD. Transferts de chaleur Dans les milieux poreux- conduction, convection, rayonnement. Technique de L'ingénieur, 2008.

[15] S.Whitaker (1977). Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: ATheory of Drying. In Advances in Heat Transfer. Elsevier, pp. 119-203.

[16] J.B.Keller, (1977). Effective behavior of heterogeneous media. Statistical Mechanics and statistical Method in theory and Application, U. Landman, ed. New York. Plenum, pp. 631-644.

[17] O. Millet, A. Ait-Mokhtar et O. Amiri, (2008). Determination of the macroscopic chloride diffusivity in cementitious porous materials by coupling periodic homogenization of Nernst-Planck équation with Experimental protocol. International Journal of Multiphysics, 2, Vol. 17, pp. 129-145

[18] F. A. L. Dullien, "Porous media: Fluid transport and pore structure", Academic press New York (1979)

[19] A .L. Dullien, "Porous media, fluid transport and pore structure», Academic press, 2nd Edition (1992).

[20] J.F. DAIAN, J.P. LAURENT: Structure poreuse et transport d'umidité dans les roches

Laboratoire d'etude des transferts en Hydrologie et environnement (INPG, UJF, CNRS URA 1512) Grenoble France.

[21] A. Tobbal, R.Bennacer et R. Cabrillac , Effet de l'anisotropie des matétriaux poreux sur les phénoménes de transfert de chaleur et de masse, proceedings du 13éme congrés francais de mécanique, vol. II, pp.457-460,1997. Paris

[**22**] **H. Beji,** Etude Numérique de la convection naturelle en milieu poreux saturé: Modélistion du nombre de Darcy et introduction de la dispersion dynamique, these de doctorat, université Paris 6, 1989.

[23] M. NICOLAS. Écoulement dans les milieux poreux. École doctorale mécanique Physique et modélisation université de Provence, Marseille, 2003.

[24] C.Beckerman et R.Visanta, Double –diffusive convection during dendritic solidification of binary mixture, physicochemical. Hydrodyn. Vol. 10, pp.195-213, 1988.

[25] G.Neale ET W.Nader, practical significance of Brinkman's extension of Darcy's law: coupled parallel flow within a channel and bounding porous medium, the Canadian J.Chem. Eng, vol.52, pp.475-478, 1974

[26]RIBIERO Joao-Paulo, Nanofluides pour les application thermique, Dossier technique de l'ingénieur, nm5115, 2009.

[27]A. LAMRI ZEGGAR, Contribution à d'etude Théorique des Transferts Thermique convectifs dans un nanofluide. Application aux modéles monophasique et diphasique, mémoire de magister université de fréres Mentouri, 2014.

[28]M. KHANTUL, etude Numérique de la convection mixte dans un canal horizontal cotenant des ailettes, thése de doctorat 3^{éme} cycle (LMD) en génie mécanique, option: génie thermique et énerrgitique, université de Constantine 2016.

[29] Elena V Timofeeva: nanofluide for Heat transfer: nanoscale research letters, special issue on nanofluides (2010).

[30]Einstein A. : Investigations on the Theory of the Brownian Mouvement. Dover Publications, New York. (1956).

[31] Brinkman H.C. : The viscosity of concentrated suspensions and solution. J. Chem. Phys., 20, 571–581. (1952).

[32] Maxwell J.C. : A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K. (1891)

[33] Hamilton R.L. and Crosser O.K. : Thermal conductivity of heterogeneous two Component systems. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1(3), 187-191. (1962).

[34] Pak B.C. and Cho Y.I. : Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with Submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151–170. (1998).

[35] Xuan Y.and Roetzel W. : Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(19), 3701-3707. (2000).

[36] Pei-Xue Jiang et al, Experimental research of fluid flow and convection heat transfer in plate channels filled with glass or metallic particles, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.20, Issue.1, pp.45-54, 1999.

[37] H. SALHI, 'Etude numérique de transfert de chaleur de nanofluide dans les Enceintes', Thèse université de Batna, 2006.

[38] A.M. Rashad et al, Natural convection boundary Layer of a non-newtonian fluid about a permeable vertical cone embedded in a porous Medium saturated with a nanofluid. Computers and Mathematics with Applications, Vol. 62 :pp. 3140–3151, 2011.

[39] M. Mahmoudi. Numerical simulation of free convection of nanofluid in a

Square cavity with an inside heater. International Journal of Thermal Sciences, vol.50 :pp.2161–2175, 2011.

[40] R. Abdul-Kahar, R. K. Muhaimin, Scaling group transformation for boundarylayer flow of a nanofluid past a porous vertical stretching surface in the presence of chemical reaction with heat radiation.computational fluid dynamics. Computers Fluids, vol.52 :pp.15–21, 2011.

[41] P. Rana et al, Numerical solution for mixed convection boundary layer flow of A nanofluid along an inclined plate embedded in a porous Medium. Computers and Mathematics with Applications, vol.64 :pp.2816–2832, 2011.

[42] D. Srinivasacharya, O. Surender. Non-similar solution for natural convective boundary layer flow of a nanofluid past a vertical plate embedded in a doubly stratified Porous medium department of mathematics. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.71 :pp.431–438, 2014.

[43] S. LEBBIHI, Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano fluide. Mémoire master, université Mohamed Khider Biskra 2014.

[44] A. DAAS et al, Simulation numérique de l'échange thermique dans une enceinte rectangulaire, article, Third International conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAE p 2016, October 30-31, 2016 Constantine, Algeria.

[45] Z. BOULAHIA et al, article : Modélisation de l'échange thermique des nano fluides dans une enceinte rectangulaire avec une paroi munie d'un bloc, Université Hassan II de Casablanca, Maroc.

[46] F. Dahami et al, Modélisation de l'échange thermique par convection naturelle de nano fluide (Cu-eau) dans une enceinte à paroi ondulée, article, 13ème Congrès de Mécanique, Meknès, 11 au 14 Avril 2017.

[47] S. KROUMA, Influence de la géométrie des nanoparticules dans un nano fluide sur le transfert thermique, mémoire de master université de Mohamed Khider Biskra, 2017.

[**48**] **S**. **TRAORE, S. et DIALO, (2001)**, « Etude d'un écoulement transitoire à surface ». Projet de fin d'études, Université A. MIRA de Bejaia.

[**49**] **D**. **ZOUAOUI. (2004), «** Simulation numérique des écoulements à surface libre avec onde». Projet de fin d'études, E. N. Polytechnique d'Alger**.**