الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقراطيـة الشعبيـة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Dr. Yahia Farés de MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie des Procédés et Environnement

Projet de fin d'études



Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

THEME

Etude de la convection thermosolutal dans une cavité poreuse saturée par une solution aqueuse

Présenté par :

BOUBEKKAI Amina

MEBREK Sabrina

Proposé et dirigé par:

Dr. REBHI Rédha

Pr. HADIDI Noureddin

Juin 2022

Remerciement

Je remercie ALLAH tout puissant qui m'a donnée la patience , la santé, le courage , la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail .

Je tiens à remercier mes encadrants : Dr. REBHI Rédha et Pr. HADIDI Noureddine , je remercie profondément le prof . LOUNIS Selma, de m'avoir conseilles ,dirigés et assisté pendant la réalisation de ce travail , ainsi que toute l'équipe pédagogique de l'université docteur Yahia farés et toutes les personnes qui nous ont aidés de près de loin

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers , je cite

Mes parents les plus cher au monde que dieu les gardes et les protège .

Mes frères : Abdenour et Abderrahmane .

Mes sœurs : Yasmine et wafa .

Mon grand-père : Saïd .

Mes oncles et tantes ainsi que leur épouses , époux et enfants .

Mes chers cousins et cousines spécialement : Asma , Newal , Nour ,Asil.

Toutes mes amies spécialement : Rekaia , Hafida , Sabrina ,

Amina

Dédicace

JE dédie ce modeste travail qui n'aurait pu aboutir et voir

La lumière sans l'aide de Dieu le tout puissant a :

Ma très chère et douce mère et mon père qui m'ont toujours

Encouragées de poursuivre mes études malgré les difficultés que j'ai

Rencontrées, que Dieu les gardes en bonne santé.

Merci ma mère, merci mon père

Je dédie spécialement mon frère et mon amis :Fouad

A mes très chères sœurs: Khadija, Manal, Farah,Nesrine,Rahma

Pour ma neveux : Islam.
A toute ma famille MEBREK

A celle qui m'a beaucoup aidé pour la réalisation de ce mémoire :

Mes chère :Dalila ; soulaf ; Amina ;Dalola ;

A tous mes amis

Avec vous je passe des bons moments

A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu' à l'université

Ma chère et mon binôme : AMINA

Sabrina

Sommaire

REMERCIMENT
DIDCAS
SOMMAIRE
LISTE DE FIGURE
LISTE DE TABLEAU
NOMENCLATURE
RESUME
INTRODUCTION GENERALE……1

CHAPITRE I :GENERALITE ET REVUES BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- Revue bibliographique ……3
I.2- Introduction ……7
I.3- Définition ……7
I.4- Les différents modes de transfert de chaleur …….....7
I.4.1- La convection …….....8
I.4.2- La conduction ……...9
I.4.3- Le Rayonnement ……10
I.5- Les types de la convection ……11
I.5.1-La convection forcée …….....11
I.5.2- La convection naturelle ……..11
I.5.3- La convection mixte ……...12
I.6-La convection naturelle thermosolutale ……..13
I.7-Transfert par diffusion ……13
I.8- Le transfert massique ……14
I.8.1-Nombre de transfert de masse ……15

Partie II- MILIEUX POREAUX

II.1-Introduction ……...15
II.2- Définitions …….....15
II.3- Les applications de milieu poreux …….....16
II.4-Notion de Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.) …….....17
II.5-Les caractéristiques des milieu poreux ……18
II.5.1-La porosité(ε) ……18
II.5.2-Perméabilité (K) ……18

II.5.3-La tortuosité …….....19
II.5.4-La surface spécifique ……..19
II.6-Les caractéristiques thermo physique …….....20
II.6.1-La viscosité thermo physique ……20
II.6.2-La conductivité thermique effective ……...20
II.7- Modèles d'écoulement en milieu poreux ……20
II.7. 1-La loi de Darcy ……..20
II.7.2-Formulation de Forchheimer ……..21
II.7.3-Formulation de Brinkman ……..21
II.7.4- Modèle général 22
II.8-Les Régimes d'écoulements de milieux poreux …….....22
II.8.1-Régime laminais STOCKES …….....22
II.8.2-Régime intermédiaire de VAN ALLEN ……22
II.8.3-Régime turbulent de NEWTON……..22

Partie III-FLUIDE NON NEWTONIEN

III.1-Introduction ……..23
III.2-Déffintion de fluide non Newtonien …….....23
III.3-Déffintion de fluide Newtonien ……...23
III.4-classification des comportements de fluide non Newtonien …….....24
III.5-Comportement indépendant du temps ……24
III.5.1 -Fluides rhéofluidifiants ou pseudo plastiques ……..25
III.5.2-Fluides viscoplastiques ……25
III.5.3-Fluides rhéoépaississant ou dilatant ……..25
III.6-Comportement dépendant du temps ……26
III.6.1 -Thixotropie ……..26
III.6.2-Rhéopexie ou antithixotropie …….....28
Conclusion …….....28

CHAPITRE II : FROMULATION MATHEMATIQUE

II.1-modélé physique et mathématique ……...29
II.2-équation générale ……..30
II.3- hypothèses simplificatrices …….....30
II.4 - formulation mathématique 30
II.5- conditions aux limites ……..32
II.6- calcul du coefficient de transfert de chaleur et de masse ……32

Conclusion …….....33

CHAPITRE III : ANALYSE ET METHODE NUMERIQUE

Approximation des dérivées par des différence finies ……34

III.1-Discretisation du domaine …….....34

III.2-Approximation des dérivées ……35

II.2.1-Approximation à l'ordre 1 en h de la dérivée première ……36

III.2.2- Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivée première par les différences centrées ……...36

III.2.3- Approximation à l'ordre 1 en h de la dérivées seconde ……...36

III.2.4-Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivée seconde ……37

III.2.5-Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivées première par les différences à droite ou à gauche ……..37

III.2.6- Approximation de U_y et U_{yy} …….....37

III.2.7-Approximation de la dérivée croisée U_{xy} ……38

III.2.8-Approximation à l'ordre n en h des dérivées …….....39

Conclusion …….....39

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DUSCUSSIONS

IV.1- introduction ……39

IV.2-Effet de la loi de puissance n sur la structure de l'écoulement …….....39

IV.3- Effet de le paramètre E sur la structure de l'écoulement ……...40

IV.4-Effet de la concertation s sur la structure de l'écoulement ……41

IV.5- Effet de le paramètre a sur la structure de l'écoulement …….....43

IV.6-Effet de la loi de puissance n sur les profils de la fonction de courant , de la température , de la concentration et de la viscosité apparente ……44

IV.7- Effet de la concentration s sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la viscosité apparente ……45

IV.8- Effet de la paramètre E sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la viscosité apparente …….....47

IV.9- Effet de paramètre a sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la viscosité apparente …….....48

Conclusion …….....49

CONCLUISION GENERALE ……51

REFERENCE BIBIOLGRAPHIQUE

Liste des figures :

Figure(I.1) : différence entre la conduction et la convection /la technologie / la différence entre des objets et termes similaire……8

Figure(I.2) : la convection…….....9

Figure(I.3) :le verre et l'isolation thermique…….....10

Figure(I.4) :le rayonnement solaire-Tète à modeler…….....10

Figure(I.5) :four à convection forcée de four combinai –vapeur(électrique) ……...11

Figure(I.6) :convection naturelle dans l'atmosphère, Cellules de Hadley……..12

Figure(I.7) :schéma du problème de convection mixte considéré (géométrie conditions aux limites)…….....12

Figure(I.8) :convection thermosolutale dans un milieu annulaire fluide de rapport de forme modéré…….....13

Figure(I.9) :l'interactions des électrons avec l'échantillon .pas de transfert……...14

Figure(I.10) : exemple d'un milieu poreux……..16

Figure(I.11) : Représentation schématique du volume élémentaire représentatif……...17

Figure(I.12) : Représentation schématique du comportement dilatant…….....26

Figure(I.13) : Courbes représentatives montrant la thixotropie dans une suspension de boue rouge……..27

Figure(I.14) : Représentation schématique de la courbe $\tau = f(\dot{\gamma}$ pour le comportement dépendant du temps……...27

Figure (II.1) : Modèle physique et système de coordonnée……29

Figure (III.1) : Maillage…….....34

Figure (IV.1) : Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente, μ. ……...40

Figure(IV.2) : Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente…….41

Figure(IV.3): Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente…….42

Figure(IV.4): Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente…….44

Figure(IV.6.5): Effet de la loi de puissance , sur les profils, la concentration s (a) , la viscosité apparente μ , (b) , la fonction d'écoulement Ψ (c), la température T (d) , la vitesse U (e) …….45

Figure(IV.7.6) : Effet de concentration s , sur les profils,la concentration s (a) , la viscosité apparente μ , (b) , la fonction d'écoulement Ψ (c), la température T (d) , la vitesse U(e)…….....46

Figure(IV.8.7) : Effet de paramètre E sur le profils , la concentration s , la viscosité apparent μ (b) , la fonction d'écoulement Ψ (c) , la température T(d) , la vitesse U (e) ……...48

Figure (IV.9.8) : Effet de paramètre a sur le profils , la concentration s , la viscosité apparent μ (b) , la fonction d'écoulement Ψ (c) , la température T(d) , la vitesse U (e) ……...49

Liste des tableaux :

Tableau(I.1) : valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux…….18

NOMENCLATURE :

Lettres latines :

C :concentration dimensionnelle du soluté.

C_p : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante.(J $Kg^{-1}.K^{-1}$).

D :Diffusivité massique ($m^2.s^{-1}$).

$\vec{g}$: Vecteur du champ d'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}).

k :Conductivité thermique du fluide (w.$m^{-1}.k^{-1}$).

k_f : perméabilité du milieu fluide.

k_m : perméabilité du milieu poreux.

Nu :Nombre de Nusselt local.

P : Pression au sein du fluide (N.m^{-2}).

P:Pressionadimensionnelle.

p^* : pression caractéristique.

p_r : nombre de prandtl.

q : Densité de flux de chaleur (w. m^{-2}).

H : Hauteur de l'enceinte .

h : coefficient de convection.

K : perméabilité du milieu poreux (m^2).

T :Température du fluide (K).

ΔT :Ecart de température ΔT = T1 – T2 (K).

L_e : Nombre de Lewis.

S' : concentration (g .mol.l^{-1}).

s_ϕ : terme source.

t : Temps (s).

u, v : Composantes de vitesse en coordonnées cartésiennes dimensionnelles (m.m^{-1}).

U, V :Composantes de vitesse en coordonnées cartésiennes a dimensionnelles.

$\vec{v}$: Vecteur vitesse du fluide (m.s^{-1}).

x, y : Coordonnées cartésiennes dimensionnelles (m).

X,Y : Coordonnées adimensionnelles.

T_c : gradient de température dans la direction x.

S_c : gradient de concentration dans la direction x.

j' : flux de masse constant par unité de surface .

S : concentration adimensionnelle.

S_0 : concentration de référence à x' = y' = 0 .

V_{por} : volume total des pores (m^3).

V_{tot} : volume total de l'enceinte (m^3).

Lettres Grecques :

α : Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$).

β_s : coefficient d'expansion solutal (g. mol. l^{-1}).

β_T : coefficient d'expansion thermique (k^{-1}).

ΔC : différence de concentration adimensionnelle.

Δt : incrément de temps adimensionnel.

ΔX : longueur adimensionnelle d'un volume de contrôle dans la direction X .

ΔY : : longueur adimensionnelle d'un volume de contrôle dans la direction Y.

τ : temps adimensionnel.

ϑ : viscosité cinématique du fluide.

μ : viscosité dynamique du fluide .

ε : porosité du milieu poreux.

λ : conductivité thermique $\lambda = \frac{k_m}{k_f}$.

$(\rho c)_f$: capacité calorifique thermique du fluide .

$(\rho c)_m$: : capacité calorifique thermique du milieu poreux saturé.

σ : rapport des capacités calorifiques $\sigma = \frac{(\rho c)_m}{(\rho c)_f}$.

Γ : coefficient de diffusion .

Nombres sans dimensions:

Da : nombre de Darcy Da= $\frac{k}{H^2}$.

Sh :Nombre de Sherwood.

Gr :Nombre de Grashof Gr = $\frac{g \beta \Delta T H^3}{\nu^2}$.

Ra: Nombre de Rayleigh = Gr.p_r .

Exposant :

Sub : valeur au seuil de la convection sous critique .

Sup : valeur au seuil de la convection supercritique .

n : relatif au temps t .

n + 1 : relatif au temps t + Δ .

Indices et exposants:

i : indice d’un point de maillage suivant x .

j : indice d’un point de maillage suivant y .

c : Chaude.

F : froide.

t : thermique.

p : poreux .

o : état se référence .

P : point au centre du volume fini .

E : point à l’est du point P .

N : point au nord du point P .

W : point à l’ouest du point P .

S : point au sud du point P .

f : fluide .

Max : Maximum .

min : Minimum .

Résumé :

Dans ce mémoire on s'intéresse et l' étude numérique de la convection thermique laminaire dans une géométrie carrée. Cette dernière et remplie par un milieu poreux homogène et saturé par un fluide binaire, les parois horizontales de l'enceinte sont adiabatiques imperméables, les parois verticales sont maintenues à des températures et des concentrations constantes et différentes, le phénomène physique est modélisé par la loi générale de Darcy, les nombres adimensionnel obtenus sont le nombre de Darcy (Da), le nombre de Lewis(Le), le nombre de Grashof (Gr), le nombre de Prandtl (Pr)…

La méthode numérique empoilée et celle de volumes finis, impliquent l'utilisation de l'algorithme SIMPLER. L'objectif de l'étude et de montre l'influence de paramètre de contrôle sur l'écoulement et le transfert de chaleur et de masse au sein de la cavité.

- L'accroissement des nombres de Grashof, Lewis et de Prandtl entrainent une accélération de l'écoulement et une augmentation du transfert de chaleur et de masse.
- La vitesse de l'écoulement et le transfert de chaleur et de masse sont considérablement réduit sous l'effet de la diminution de la perméabilité du milieu poreux.

Mots clés : convection thermosolutal / Milieu poreux/ Géométrie carrée/ Modèle de Darcy / Volumes finis

ملخص

في هذه المذكرة نقوم بدراسة عددية للحمل الحراري الصفحى داخل تحويف مربع .هذا الاخير مملوء بمادة مسامية متجانسة و مشبعة بسائل ثنائي . الجدران الافقيان لتجويف كظمين غير نفوذين و الجدران العموديين يخضعان .هذه الاخيرة لدرجات حرارة و تراكيز ثابتة و مختلفة . سنقوم بدراسة الظاهرة الفيزيائية بنموذج القانون العام الدراسي

تتأثر بالعوامل التالية "عدد دراسي .عدد اويس .عدد برانتل و النسبة بين قوى الحجوم الحرارية و المادية .

الطريقة العددية المتبعة هي طريقة الحجوم المنتهية باستعمال خوارزمية سمبلر.

الهدف من الدراسة هو عرض تأثير خصائص المراقبة بين السريان و انتقال الحرارة و المادة

سرعة السريان و انتقال الحرارة و المادة تتناقص بفعل تناقص عدد دراسي .

الكلمات المفتاحية " الحمل الحراري. وسط مسامي . نموذج دراسي . الحجوم المنتهية

Abstract :

In This work , a numerical study of laminar in a square cavity filled with a binary mixture was investigated numerically. The horizontal walls of the enclosure are adiabatic and impermeable. As against the vertical walls are subjected to constant temperatures and concentrations. Equations modeling the coupled physical phenomena are discretized numerically by the finite volume method. Algorithm (SIMPLER) was used to solve algebraic equations. The result obtained show the structure of the flow and heat transfert and mass transfert in the enclosure. The flow in the porous media in the enclosure is modeled by Darcy model. The convectif flow is governed by the Darcy number(Da) the Lewis number(Le), the Grashof number(Gr), the Prandtl number (Pr), the buoyancy ratio(N)…

The increase of the Grashof, Lewis and Prandtl numbers leads to an acceleration of the flow and an increase in the transfert of heat and mass.

The velocity of flow and the transfer of heat and mass are considerably reduced as a result of the decreased permeability of the porous medium.

Key words :thermosolutal convection , porous media , model of Darcy , finite volume .

Introduction générale

Introduction générale :

La convection naturelle des fluides non-newtoniens dans les milieux poreux est un sujet de recherche important. un sujet de recherche pertinent, présent dans de nombreuses applications d'ingénierie telles que le traitement des aliments liquides , l'industrie pétrolière et le stockage de l'énergie solaire par des matériaux à changement de phase. Stockage de l'énergie solaire par des matériaux à changement de phase La convection thermique est le phénomène de transport dans lequel les différences de température sont à l'origine de gradients de densité qui sont responsables de valeurs élevées des forces de flottabilité par rapport aux forces visqueuses. La complexité de la mécanique des fluides et du transfert de chaleur augmente lorsque l'écoulement est dans un milieu poreux. transfert de chaleur augmente lorsque l'écoulement se fait dans un milieu poreux et que le fluide a un comportement non fluide a une rhéologie non-newtonienne.

Getachew et al. ont décrit le type d'écoulement et les schémas de transfert de chaleur et de masse de la double diffusion. type d'écoulement et les modèles de transfert de chaleur et de masse de la double diffusion à l'intérieur d'une enceinte poreuse saturée d'un fluide non-newtonien de type power-law. non newtonien en utilisant des arguments d'échelle vérifiant les résultats obtenus par des expériences numériques. Kim et Hyun ont étudié les effets de la génération de chaleur sur la convection naturelle dans une enceinte poreuse. chaleur sur la convection naturelle dans un milieu poreux saturé d'un fluide de loi de puissance dans une enceinte.

Hadim a utilisé le modèle modifié de Brinkman-Forchheimer étendu pour décrire par une étude numérique la convection naturelle de fluides non-newtoniens de loi de puissance dans une cavité poreuse. La convection libre transitoire d'un fluide non-newtonien avec une rhéologie de loi de puissance le long d'une surface noyée dans un poreux anisotrope en perméabilité a été étudiée par la méthode des caractéristiques par Degan et al. caractéristiques par Degan et al Cheng a résolu par la méthode de collocation cubique spline les équations de la couche limite de la chaleur naturelle, les équations de la couche limite de la convection thermique naturelle convection naturelle des fluides de loi de puissance dans les milieux poreux pour un cône vertical avec conditions aux limites mixtes, y compris le transfert de masse avec des variations sur température et la concentration de la paroi et d'un cône vertical ondulé .

L'objectif de la présente étude est de simuler numériquement la génération d'entropie et les propriétés de transfert de chaleur et de masse d'un écoulement laminaire à l'intérieur d'une cavité carrée saturée par un fluide poreuse, dont les parois actives sont soumises à des gradients de température et de masse uniformes et constantes , respectivement, tandis que les autres parois sont maintenues adiabatiques et imperméable. **[1]**

Le mémoire est divisé en trois chapitres :

- ✓ **Le premier chapitre** est consacré à transfert de chaleur et de masse, la présentation du milieu poreux et ses caractéristiques et classification des fluides Non-newtonien , ainsi une recherche bibliographique.
- ✓ **Le second chapitre** concerne la formulation mathématique du problème où nous avons présenté, les équations gouvernantes, les hypothèses simplificatrices et les conditions aux limites associées. exposé la méthode des volumes finis d'une façon détaillée, utilisée pour la discrétisation du système d'équations adimensionnel régissant le phénomène physique.
- ✓ **Le troisième chapitre** est présentée la méthode numérique choisie pour la résolution des équations de conservation .
- ✓ **Le quatrième et dernier chapitre** les principaux résultats numériques de cette simulation ou nous avons étudié l'effet du maillage, valider nos résultats ainsi que leurs interprétations et analyse.
- ✓ **Finalement,** nous terminons avec une conclusion qui récapitule les principaux résultats issue de cette simulation numérique.

Chapitre I : Généralité et Revues bibliographiques

Revue bibliographique :

Les différents travaux expérimentaux et numériques que nous allons exposer dans la section revue bibliographique, ont été réalisés afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur la convection naturelle et la génération d'entropie, à l'intérieur des cavités.

Nicolas et Nanstee (1993) ont étudié expérimentalement la convection naturelle à l'intérieure d'une enceinte carrée, dans laquelle une partie de la paroi inférieure est chauffée **(2/3 L)**, tandis que la paroi droite est refroidie à température constante (voir figure I.17). Les résultats indiquent qu'aucune variation notable dans la structure de l'écoulement de base n'a été observée pour la gamme $\mathbf{1/3 \leq l/L \leq 2/3}$. En outre, une légère tendance à l'augmentation du transfert de chaleur de la partie refroidie avec l'augmentation du nombre de Rayleigh**.[2]**

Sahu et Mathur (1996) ont étudié la convection libre dans les écoulements de couches limites de fluides de loi de puissance devant une plaque plane verticale avec aspiration /injection. Ils ont observé que l'aspiration /injection a un effet significatif sur le champs de vitesse et de température **.[3]**

Rami et Arun (2000) ont étudié la chaleur de convection libre et de transfert de masse de fluides non newtoniens de loi de puissance avec une limite d'élasticité à partir d'une plaque plate verticale dans un milieu poreux saturé. Ils ont conclu que les profils de vitesse , de température et de concentration ainsi que les taux de transfert de chaleur et de masse locaux sont considérablement affectés par la rhéologie du fluide en plus du rapport de flottabilité et du nombre de Lewis du fluide**.[4]**

Postelnicu (2004) a analysé le transfert simultané de chaleur et de masse par convection naturelle à partir d'une plaque verticale plane noyée dans un milieu poreux saturé de fluide électriquement conducteur en utilisant le modèle Darcy Boussinesq en présence d'effets Dufour et Soret et a fait remarquer que comme paramétré magnétique augment. L'épaisseur de la couche limite hydrodynamique/thermique/concentration augmente **.[5]**

Basak et al. (2006) ont fait une étude numérique pour l'écoulement laminaire stable au cours de la convection naturelle dans une cavité avec un chauffage uniforme et non-uniforme de la paroi de fond . Ils ont observé que le chauffage non-uniforme de la paroi inférieure produit des taux plus élevés de transfert de chaleur au centre de la paroi de fond que le cas de chauffage uniforme, pour tous les nombres de Rayleigh**.[6]**

Cheng (2006) a examiné le flux de chaleur de convection naturelle et le transfert de masse de fluide non newtoniens de loi de puissance avec une limite d'élasticité dans des milieux poreux à partir plaque verticale avec des flux de chaleur et de masse de paroi variables. Il a observé que l'existence d'un gradient de pression seuil dans les fluides de la loi de puissance a tendance à diminuer la vitesse du fluide et les nombres locaux de Nusselt et Sherwood. En outre ,une augmentation de l'exposant de la loi sur l'énergie a augmenté les nombres locaux de Nusselt et Sherwood.**[7]**

Abreu et al. Ont abordé les flux des couches limites de convection libre et forcée avec soret et Dufour**.(2006)** . l'effet des paramètres soret et Dufour sur les transferts de chaleur et de masse par convection libre à partir d'une surface verticale dans une milieu poreux darcien doublement stratifié a été rapporté par Lakshmi Narayna et Murthy(2007).**[8]**

Huei Chen et Chen (2007) ont simulé numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée avec des sources de chaleur discrètes pour les parois gauche et inférieure Les résultats numériques indiquent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec le nombre de Rayleigh dans les deux cas. En outre, l'effet de la vitesse du transfert de chaleur due à la résistance de chauffage est plus important que Pour l'effet de la dimension de chauffage, on constate qu'en augmentant la longueur du segment de la source de chaleur, le taux de transfert de chaleur est progressivement augmenté dans les deux cas**.[9]**

Kandaswamy et Eswaramurthi (2008) ont fait l'étude de la convection induite dans une cavité carrée poreuse avec des températures variables des parois latérales. Les résultats révèlent que l'effet de la densité maximale est de ralentir la convection naturelle et de réduire le transfert de chaleur moyen. La force de la convection et la vitesse de transfert de chaleur deviennent plus faible en raison de la limitation d'écoulement dans le milieu poreux à faible porosité**.[10]**

Corvaro et Paroncini (2008) ont analysé expérimentalement et numériquement l'influence de la position de la source de chaleur sur le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité carrée. Ils ont observé que la configuration de la source de chaleur, qui est située au centre, indique une évolution symétrique de ce phénomène et donc une répartition symétrique du nombre de Nusselt local**.[11]**

Krishna et al. (2008) ont analysé numériquement la convection naturelle dans une cavité carrée contenant un milieu poreux anisotrope, avec génération de la chaleur

hydrodynamique et thermique. Ils ont constaté que les propriétés anisotropes ont une influence significative sur le comportement de l'écoulement et le transfert de chaleur**.[12]**

Kairi et Murthy (2009) ont analysé le transfert de chaleur par convection libre à partir d'une plaque plate verticale noyée dans un milieu poreux non newtonien stratifié thermiquement saturé et non Darcy**.[13]**

Varol et al. (2009) ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée inclinée chauffée. Ils ont observé que le transfert de chaleur est maximal ou minimal en fonction de l'angle d'inclinaison et l'effet du nombre de Prandtl sur le nombre de Nusselt moyen est plus importante pour Pr <1**.[14]**

Öğüt (2009) ont fait une étude sur le transfert de chaleur par convection naturelle dans une enceinte carrée inclinée, où le côté vertical gauche est chauffé avec un flux de chaleur constant, le côté droit est refroidi, tandis que les autres côtés sont maintenus adiabatiques Les résultats montrent que la longueur chauffée est un paramètre important qui influe sur les champs de température et de débit. Le transfert de chaleur moyen diminue avec une augmentation de la longueur de l'élément chauffant.**[15]**

Kaluri et Basak (2010) ont fait une étude qui se concentre sur l'amélioration du traitement thermique des matériaux, pendant la convection naturelle dans quatre cavités carrées poreuses discrètement chauffées. Ils ont trouvé que le mélange thermique est élevé , où les sources de chaleur sont situées au centre de la paroi de la cavité**.[16]**

Sankar et al. (2011) ont analysé numériquement la convection naturelle dans une cavité carrée poreuse avec des parois verticales partiellement actives.Ils ont trouvé que l'emplacement des zones de chauffage a une influence significative sur le taux de transfert de chaleur, ce dernier se trouve à être plus élevé et augmente en augmentant le nombre de Grashof, la porosité et le numéro de Darcy (en particulier lorsque Da $\leq$ 10-3 et Gr $\geq$ 104). En outre, les parois de la cavité partiellement (chauffées / refroidies), produisent un taux de transfert de chaleur supérieur par rapport aux parois entièrement (chauffées / refroidies). Les effets de la taille et de l'emplacement de l'appareil de chauffage sur le transfert de chaleur par convection naturelle dans un anneau poreux vertical ont été étudiés numériquement par **Sankar et al. (2011)**. Ils ont constaté que pour un faible nombre de Darcy (10-6), le taux de transfert de chaleur est plus élevé lorsque l'appareil de chauffage est situé au milieu de la paroi intérieure, mais lors que le nombre de

Darcy augmente, l'endroit du dispositif se déplace vers l'extrémité inférieure de la paroi intérieure. En outre, l'effet de la porosité sur le taux global de transfert de chaleur est faible à faible nombre de Darcy, alors que son effet devient significatif à des valeurs plus élevées du nombre de Darcy**.[17]**

Soleimani et al. (2011) ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée fermée, pour déterminer la localisation optimale de deux sources de chaleur (sourcepuits). Les résultats numériques révèlent que les configurations optimales sont en fonction du nombre de Rayleigh et les dimensions des sources et des puits ; l'augmentation du nombre de Rayleigh entraine une diminution de la source de chaleur, mais une augmentation du dissipateur de chaleur**.[18]**

Saravanan et Sivaraj (2011) ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée remplie d'air, avec une source de chaleur non-uniforme localisée et montée centralement sur la paroi de fond. Les parois verticales sont refroidies, tandis que la paroi supérieure et les parties restantes de la paroi de fond sont maintenues adiabatiques . Ils ont constaté que pour Gr = 10^6, le chauffage non-uniforme de la source améliore nettement le taux global du transfert de chaleur par rapport à un chauffage uniforme de la source de chaleur, alors que pour Gr = 10^7 son effet est négligeable**.[19]**

Nabavizadeh et al. (2012) ont fait la simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée contenant un cylindre sinusoïdale à différentes amplitudes. Les résultats montrent que, en augmentant l'amplitude (le nombre d'ondulations) ou en changeant l'angle, peut changer le coefficient de transfert de chaleur, qui a une influence considérable sur la température et le champ de fluide**.[20]**

Wang et al. (2012) ont fait l'analyse numérique du transfert de chaleur par convection, à partir d'une plaque mince chauffée située au milieu d'une cavité carrée inclinée . Ils ont montré que l'écoulement du fluide et les champs de température dépendent fortement du nombre de Rayleigh et des angles d'inclinaison. En outre, pour la position verticale de la plaque mince, le transfert de chaleur augmente avec un angle d'inclinaison **φ** inférieur à différents nombres de Rayleigh**.[21]**

Hasan et al. (2012) ont fait une étude numérique sur la convection naturelle dans une enceinte carrée différentiellement chauffée, avec des parois latérales ondulées pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh. Les résultats montrent que l'augmentation de

l'amplitude d'ondulation et de la fréquence d'ondulation réduit le taux de transfert de chaleur, indiqué par la réduction du nombre de Nusselt moyen.**[22]**

Partie I- TRANSFERT DE CHALEUR

I.2-Introduction :

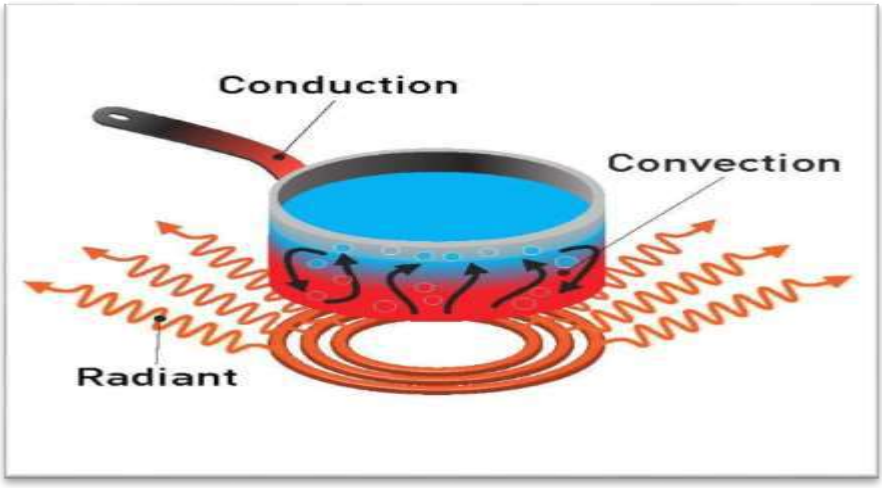
Le phénomène de transfert de chaleur et de masse par la convection naturelle, dans des espaces confinés ou semi-confinés, est généralement dû à la présence des gradients de température et de concentration. Ces gradients causent une distribution non uniforme de la densité du mélange qui provoque à son tour un mouvement convectif sous l'effet de la cavité. Le contenu des espaces peut être un milieu fluide ou un milieu poreux saturé par un fluide. Dans la plupart des situations, que ce soit dans la nature ou dans l'industrie, le fluide est constitué de deux ou plusieurs composants**[23]**. Ainsi , qu'il se manifeste sous diverses formes (rayonnement, conduction et convection), cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiés tels que le refroidissement des processeurs et des composantes électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleurs des procédés industriels, etc.

I.3-Défintion :

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d' énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermique. Ils jouent un rôle essentiel en thermodynamique . Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a alors transfert de chaleur. **[24]**

I.4- Les différents modes de transfert de chaleur :

Si un solide est à une température uniforme on dit qu'il est en équilibre thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. Dès qu'il existe entre deux corps, ou entre deux parties d'un même corps une différence de température ; cette dernière tend à disparaître spontanément par échange de chaleur qui peut se faire par trois modes différents : Conduction, Convection et Rayonnement.



Figure(I.1) :différence entre la conduction et la convection /la technologie / la différence entre des objets et termes similaire.

I.4.1- La convection :

La convection consiste essentiellement au transfert de l'énergie thermique par le mouvement ou le déplacement macroscopique au sein du fluide. On distingue trois types de convection, la convection naturelle où le mouvement des particules est dû à la différence de température qui est imposée au fluide, cette différence de température implique une différence de masse volumique, par contre la convection forcée est le résultat du mouvement des particules qui résulte de la différence de pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques et la convection mixte qui est la combinaison des deux dernières. Quel que soit le type de convection (libre ou forcée) et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur Φ extrait par le fluide froid de température T_f au voisinage d'une paroi de surface S et de température $T_p$telle que $T_p > T_f$, est donnée par la loi de Newton **[25]** :

$$\Phi = h.S.(T_p - T_f) \qquad \text{(I.1)}$$

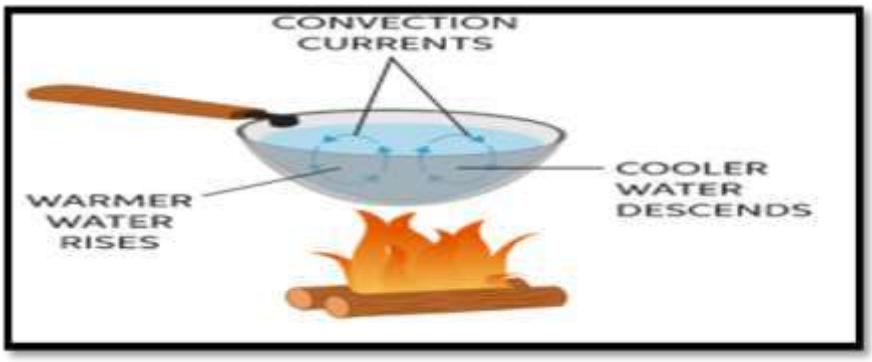
Φ: Flux de chaleur transmis par convection (W),

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

Tp : Température de surface du solide (k),

Tf : Température du fluide froid (k),

S: Aire de la surface de contact entre le solide et le fluide (m^2).



Figure(I.2) :la convection

I.4.2-La conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de la chaleur au sein d'un milieu sans déplacement de la matière en présence d'un gradient de température. Dans les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement et dans le cas des fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.**[25]**

Ce transfert de chaleur obéit à la loi de Fourier exprimée par l'équation (I.2) :

$$dQ = -\lambda . S . \frac{dT}{dx} . dt \qquad (I.2)$$

dQ: Quantité de chaleur transmis par conduction (J),

λ: Conductivité thermique du milieu ($W \,.\, m^{-1} . k^{-1}$),

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

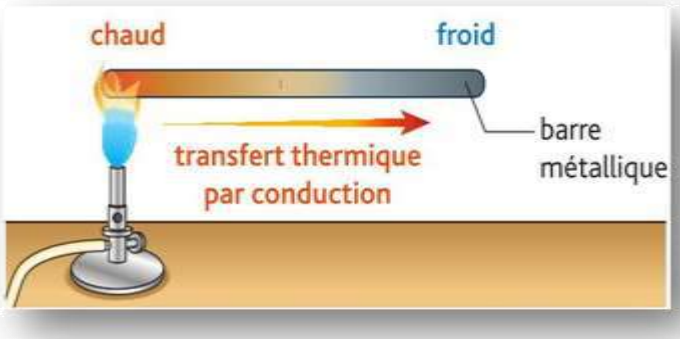
$\frac{dT}{dx}$:Gradient de température en ($k.m^{-1}$).

Le flux de chaleur Φen watt qui circule est donné par :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda . S \frac{dT}{dx} \qquad (I.3)$$

Ainsi que la densité de chaleur en ($w.m^{-2}$)

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \qquad (I.4)$$



Figure(I.3) :le verre et l'isolation thermique.

I.4.3-La rayonnement :

Le rayonnement est considéré comme un transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à température élevée vers un autre milieu à faible température sans aucun support matériel.

Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique, ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière. Dans ce cas nous avons la relation suivante **[25]** :

$$\Phi=\varepsilon.\sigma.\ S.\ (T_s^4 - T_\alpha^4) \qquad \text{(I.5)}$$

Avec :

Φ: Flux de chaleur transmis par rayonnement (W),

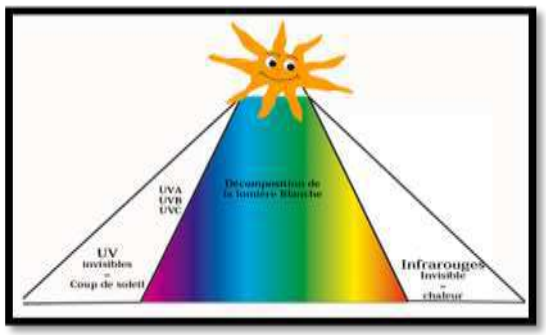
σ: Constante de Boltzmann (= 5.67 . 10^{-8} $w.\ m^{-2}.k^{-4}$),

ε: Facteur d'émission de la surface,

T_s: Température de la surface (K),

T_α: Température du milieu environnant la surface (K),

S: Aire de la surface (m^2).



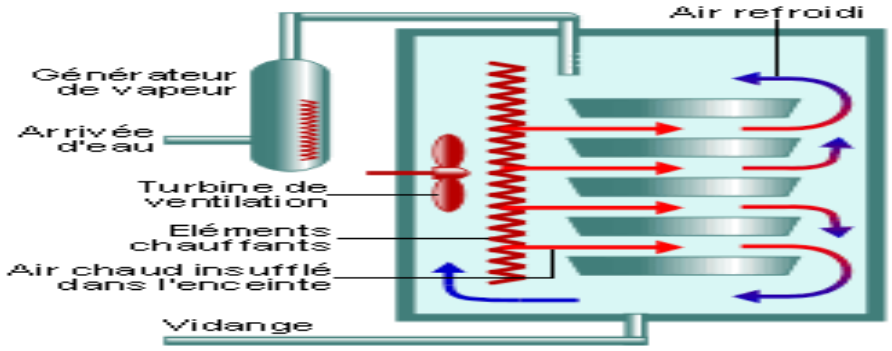
Figure(I.4) :le rayonnement solaire-Tète à modeler

I.5-Les types de la convection :

La transmission de chaleur par 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 qu'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.**[26]**

I.5.1-La convection forcée :

Le mouvement de fluide est causé par l'action des forces extérieures du processus (par exemple pompe, ventilateur, etc.) qui lui imprime des vitesses de déplacement assez importantes. En conséquence, l'intensité du transfert thermique par convection forcée sera en liaison directe avec le régime de mouvement de fluide.**[27]**

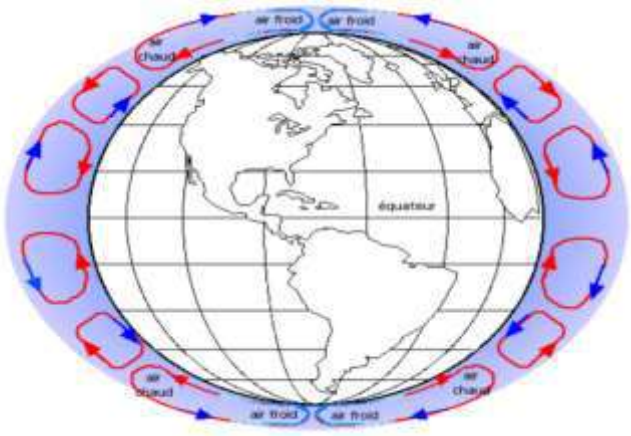


Figure(I.5) :four à convection forcée de four combinai –vapeur (électrique)

I.5.2-La convection naturelle :

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité dus à la différence de la température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produit pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud. Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre. On peut observer les effets de la convection quotidiennement

dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique .les vents et les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle.**[26]**



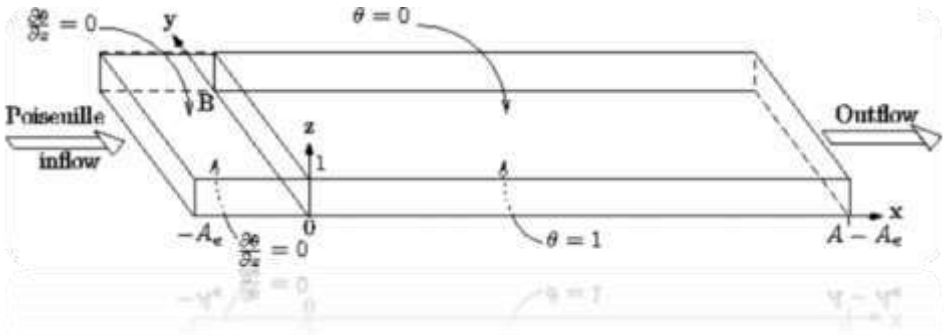
Figure(I.6) :convection naturelle dans l'atmosphère, Cellules de Hadley.

I.5.3-La convection mixte :

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents quant les vitesses d'écoulement, fictives dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur.

L'étude des écoulements convectifs dans des cavités fermés possède de nombreuses applications dans le domaine industriel considérant les diverses combinaisons des différences de la température imposé et des configurations géométriques de la cavité.

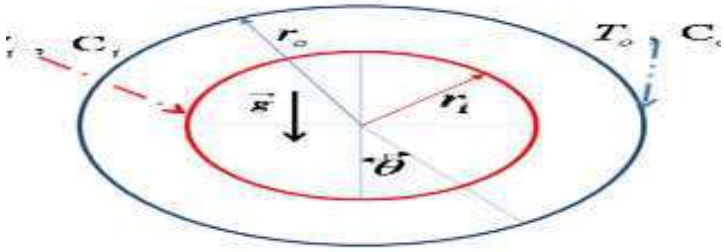
L'interaction de l'écoulement cisaillé dû au mouvement des parois et de l'écoulement de la convection naturelle dû à l'effet de flottabilité constitue jusqu'à présent un domaine de recherche fondamental et nécessite une analyse complète pour comprendre la physique de l'écoulement résultant et du transfert de chaleur.**[27]**



Figure(I.7) :schéma du problème de convection mixte considéré (géométrie conditions aux limites)

I.6-La convection naturelle thermosolutale :

Ce phénomène a été largement étudié pendant les dernières décennies. Un nombre important des travaux de recherche sur ce sujet est très abondant dans la littérature. Par ailleurs, le mouvement d'un fluide peut être généré par des variations de densité conséquence de l'existence d'un champ de gradient de température ou d'autres quantités scalaires. Dans le cas le plus fréquent, les deux quantités scalaires responsables de ces mouvements convectifs du fluide sont les gradients de température et de concentration. Ce phénomène cruciale est connu sous le nom de convection thermosolutale ou double diffusion. En effet, ces deux forces de poussées peuvent agir ensemble ou bien en opposition selon des conditions aux frontières ainsi que le coefficient d'expansion solutale.**[28]**



Figure(I.8) :convection thermosolutale dans un milieu annulaire fluide de rapport de forme modéré.

I.7-Transfert par diffusion :

Comme dans la convection thermique, la convection massique est la superposition de deux mécanismes de transferts : transport dû au mouvement de la matière, et diffusion moléculaire.

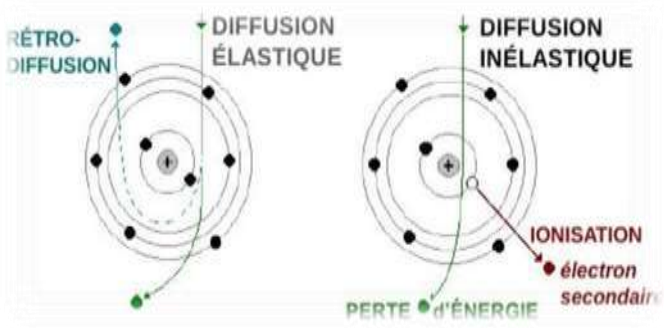
Les phénomènes de diffusion pure constituent des exemples de transfert d'une grandeur extensive sans mouvement apparent à l'échelle macroscopique. Ils sont gouvernés par le gradient de densité volumique locale ($g$rad C) de la grandeur considérée, et par le coefficient de diffusion D caractéristique du phénomène et du milieu, sous la forme :

$$q_s = - D grad\ C \qquad (I.6)$$

La concentration d'un constituant dans un mélange fluide peut être exprimée de plusieurs

manières : (concentration massique $\rho_i$molaire m_i, fraction molaire $\frac{m_i}{m}$, et finalement la fraction massiquec_i.

Dans notre cas en exprime la concentration par la fraction massique $c_i=\frac{\rho_i}{\rho}$. Donc, la fraction massique de l'espèce *i* est la masse de l'espèce *i* divisée par la masse totale du mélange.**[28]**



Figure(I.9) :l'interactions des électrons avec l'échantillon .pas de transfert.

I.8- Le transfert massique :

Le transfert massique, basée sur la diffusion d'un fluide dans un autre, trouve de nombreuses applications dans les problèmes de séchage, d'évaporation ou de condensation, de mélange, ainsi qu'en électrochimie et dans certaines opérations de séparation par diffusion. Sa modélisation s'appuie sur le même cadre que la convection thermique, et le passage de l'une à l'autre ne comporte aucune difficulté, du moins dans les cas où il n'y a pas d'interférences avec un transfert de chaleur.**[29]**

- **Equation de Fick :**

Plaçons-nous dans un système unidirectionnel et considérons le flux de particules d'une certaine espèce Les particules peuvent être des molécules, des atomes ou des ions, des défauts ponctuels, des électrons libres ou des trous électroniques, etc… Soit *c(x, t*) leur concentration, exprimée e nombre de particules ou de moles par unité de volume.

$$J=- D\ \partial c/\partial x \qquad \text{(I.7)}$$

D : est appelé coefficient de diffusion, ou diffusivité.

Le flux est exprimé en nombre de particules ou de moles traversant l'unité d'aire par unité de temps. Il s'ensuit que Da pour dimensions m^2s^{-1}.cette loi, dite loi de Fick, est formellement identique à la loi de Fourier pour l'écoulement de la chaleur.**[29]**

$$q= - k \frac{dT}{dx} \qquad \text{(I.8)}$$

où K est la conductivité thermique.

I.8.1-Nombre de transfert de masse :

- Nombre de Sherwood**[30]** :

$$Sh = \frac{J\,total}{j\,diffuition} = \frac{Lc\,v}{D} \quad \text{(I.9)}$$

- Nombre de péclet**[30]** :

$$p_e = \frac{j_{total}}{j_{diffuition}} = \frac{Lc\,v}{D} \quad \text{(I.10)}$$

- Nombre de Stanton**[30]** :

$$St_{thermique} = \frac{j_{total}}{j_{convection}} = \frac{k_m}{v} \quad \text{(I.11)}$$

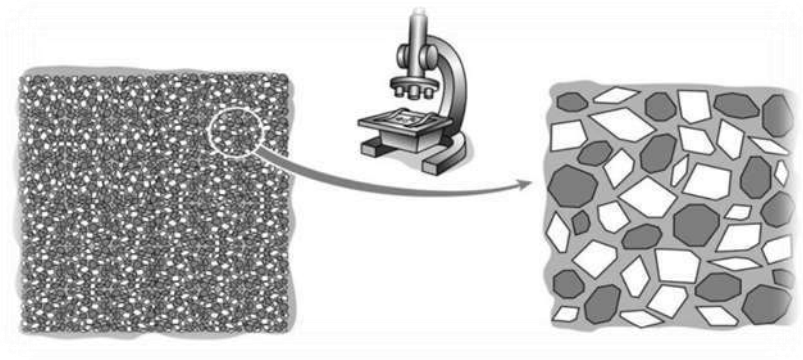
Partie II- MILIEUX POREAUX

II.1-Introduction:

Les paramètres qui conditionnent les écoulements dans les sols saturés sont la gravité et les forces de frottement au niveau des grains. Ces paramètres sont dus essentiellement à la viscosité, tandis que les écoulements dans les sols non saturés mettent en jeu les interactions entre les trois phases : solide, liquide et gazeuse. En plus de la gravité et des forces de friction, il existe en effet des forces de surface importantes qui interviennent au niveau des interfaces eau- air- solide. Ces dernières sont généralement fonction des degrés de saturation en eau et en air, de la nature des liaisons chimiques, de la température et de la pression.**[31]**

II.2-Définitions :

Un milieu poreux est usuellement défini comme étant un milieu solide contenant des pores; les pores sont des espaces vides pouvant être interconnectés ou séparés. Pour qu'une phase fluide puisse percoler dans un milieu poreux donné, au moins une partie de sa porosité doit être constituée de pores interconnectés. Ces pores, dont les formes et les dimensions sont d'une grande diversité, constituent les réseaux poreux qui offrent un grand nombre de possibilités au cheminement d'un fluide**.[31]**



Figure(I.10) : exemple d'un milieu poreux.

II.3-Les applications de milieu poreux :

Nous citons quelques applications ou l'utilisation du matériau mousse métallique apporte une valeur ajoutée certaine aux systèmes qui l'utilisent.**[32]**

- **Electrode poreuse :**

l'utilisation de mousse métallique comme électrode de batterie est l'une des premières applications historiques (Ni-MH).plus récemment, l'utilisation des électrodes en mousses métalliques a été étendue aux piles à combustibles.**[32]**

- **Echangeur de chaleur :**

Les échangeur compacts permettent de réduire l'encombrement, le poids et le cout des dispositifs d'échange thermique. Ils prennent une place de plus en plus importante dans tous les domaines de l'industrie et en particulier dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile, de l'aéronautique et de la cryogénie.**[32]**

- **Filtration :**

L'utilisation de mousse métalliques pour des applications de type « filtration » possède un potentiel applicatif fort. Les faibles pertes de pression en écoulement associées à une surface spécifique non négligeable rendent le matériau performant lorsqu'il s'agit de filtrer un écoulement « fluide/solide ».**[32]**

- **Purification de l'eau :**

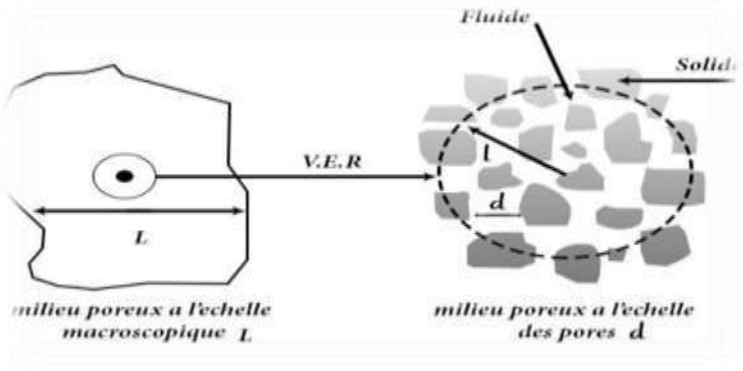
L'utilisation de mousse de « cuivre – argent » pour la purification de l'eau est une nouvelle voie de développement. Le contact entre liquide et les métaux peut agir contre les bactéries et les algues transportées par le fluide.**[32]**

- **Applications biomédicales :**

L'institut des matériaux industriels (IMI) a récemment développé un procédé de fabrication de mousses métalliques. La structure ouverte de ce type de matériau est particulièrement adaptée pour la fabrication d'implants ou de systèmes d'ancrage poreux.**[32]**

II.4-Notion de Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.) :

La notion du volume élémentaire représentatif (V.E.R) consiste à associer à un point mathématique les propriétés d'un volume suffisamment représentatif pour définir ou mesurer les propriétés moyennes du milieu . Dans la présentation continue d'un milieu poreux, les variables physiques décrivant le milieu, discontinues à l'échelle microscopique, sont remplacées par des fonctions continues à l'échelle macroscopique. La valeur de chaque variable physique affectée à un point mathématique dans l'espace continu est obtenue en moyennant la propriété physique sur un volume élémentaire représentatif (VER). **[33]**



Figure(I.11) : Représentation schématique du volume élémentaire représentatif.

II.5-Les caractéristiques des milieu poreux :

II.5.1-La porosité(ε) :

La porosité est définie comme le rapport du volume vide occupé par les pores, sur le volume total du milieu poreux soit**[34]** :

$$\varepsilon = \frac{volumes\ des\ pores}{volume\ total\ des\ milieu\ poreux} \quad (I.12)$$

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
Filtre à cigarette	0.17 – 0.49
Brique	0.16 – 0.34

Tableau I.1 :valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux.**[32]**

II.5.2-Perméabilité (K) :

La perméabilité K se réfère à la capacité du milieu poreux à laisser passer le (ou les) fluides à l'intérieur des pores. D'une autre façon, la perméabilité K caractérise la résistance du milieu poreux à l'écoulement. La perméabilité K dépend de la porosité et de la géométrie de la matrice solide. Elle est indépendante de la nature du fluide utilisé. Généralement, K est déterminée par des mesures expérimentales, par le biais de la loi de Darcy. (1 Darcy = perméabilité d'un milieu poreux de 1 cm^2 de section, 1 cm de longueur, soumis à une différence de pression de 1 bar traversé par un fluide dont la vitesse de filtration est 1 cm/s, 1 Darcy = $9.87.10^{-13}$ m^2).**[34]**

$$K = \frac{-\left(\frac{Q}{S}\right).\mu}{\partial p/\partial x} \quad (I.13)$$

$\frac{Q}{S}$:Vitesse de filtration (vitesse Darcienne) dans le milieu poreux ;

Q :Débit s'écoulant à travers le milieu poreux ;

S : Surface de la section droite ;

μ : Viscosité dynamique ;

$\frac{\partial p}{\partial x}$: Gradient de pression dans le sens de l'écoulement.

II.5.3-La tortuosité :

La description de la géométrie des pores fait intervenir la notion de connectivité, correspondant à la complexité du chemin continu à travers l'espace des pores. Il faut aussi tenir compte des « bras morts », qui sont nombreux dans les milieux peu poreux et très hétérogènes. Pour décrire ces différents aspects, on introduit un paramètre τ appelé tortuosité, que l'on définit de la manière suivante **[35]:**

$$\tau = \frac{L_e}{L} \qquad \text{(I.14)}$$

Où $L_e$est la longueur réelle des lignes de courant du fluide traversant un échantillon de longueur **L** d'un milieu poreux modélisé sous la forme d'un réseau de capillaires ou ondulés. Ce rapport joue un rôle important dans les problèmes de diffusion.

II.5.4-La surface spécifique :

La surface spécifique est définie comme l'aire totale des vides rapportée à l'unité de volume, soit **[32]**:

$$A_s = \frac{Aire\ totale\ des\ vides}{Volume\ totale\ du\ milieu} \qquad \text{(I.15)}$$

Ce paramètre sert d'élément comparatif pour différents milieu poreux de volume total v.

II.6-Les caractéristiques thermo physique :

II.6.1-La viscosité thermo physique :

Propriété de résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. Elle est exprimée par un coefficient représentant la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière.**[36]**

II.6.2-La conductivité thermique effective :

Vu la complexité de la structure des milieu poreux ainsi que la présence des différents phases (solide et fluide),la modélisation du transfert de chaleur à travers les milieux poreux nécessite l'introduction de la notion de conductivité thermique effective k_e. En effet ,les phases solides et fluide présentes dans le milieu poreux contribuent généralement avec des proportions différentes au mode de conduction (le plus souvent k_{solide}>k_{fluid}). Cette conductivité effective dépend de la porosité et des conductivités thermiques des phases solides $k_s$et fluide k_f. Les modèles proposés sont tous des combinaisons pondérées des modèles série et parallèles basés sur l'analogie électrique.**[32]**

1. Dans le modèle série, le flux de chaleur traverse successivement les phases solide et fluide.

$$\frac{1}{k_c} = \frac{\varepsilon}{k_f} + \frac{1-\varepsilon}{k_s} \qquad \text{(I.16)}$$

2. Dans le modèle parallèle, le flux de chaleur traverse en même temps les deux phases qui sont parallèles.

$$k_e = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon\, k_f \qquad \text{(I.17)}$$

II.7- Modèles d'écoulement en milieu poreux :

II.7. 1-La loi de Darcy :

La dynamique des fluides homogènes dans, les milieux poreux, est décrite par la loi de Darcy, établie en 1856 sur des fondements expérimentaux. Cette loi, établie à partir d'écoulements unidirectionnels sur des colonnes de sables, a mis en évidence la proportionnalité du gradient de pression appliqué et le débit d'eau traversant la colonne de

sable. Depuis, les sciences hydrogéologiques sont basées sur la loi de Darcy même pour les écoulements multidirectionnels**[29]**. Elle s'écrit :

$$\vec{v} = \frac{K}{V}\left(-\frac{\nabla P}{\rho}\right) + \vec{g} \qquad \text{(I.18)}$$

$\vec{v}$: Le vecteur vitesse de Darcy,

k : La perméabilité intrinsèque du milieu,

V :viscosité cinématique du fluide,

∇P : le gradient de pression appliqué.

II.7.2-Formulation de Forchheimer :

Dans le cas d'un écoulement de faible intensité, l'équation de Darcy suffit pour décrire l'écoulement. En revanche, avec l'augmentation de la vitesse, l'effet inertiel, non linéaire devient important et l'équation de Darcy devient insuffisante pour décrire l'écoulement**[29].** Ward propose dans ce cas de remplacer l'équation de Darcy par l'équation :

$$\nabla P = \rho\, g - \frac{\mu}{\kappa}\,\bar{v} + \frac{b\rho}{\sqrt{\kappa}}\,|\bar{v}|\,\bar{v} \qquad \text{(I.19)}$$

II.7.3-Formulation de Brinkman :

Brinkman (1947) a étendu la loi de Darcy en introduisant un terme équivalent au terme de dissipation visqueuse dans la loi :

$$\vec{\nabla} P = -\frac{\mu}{\kappa}\bar{v} + \mu_{eff}\,\nabla^2\bar{v} + \rho\,\vec{g} \qquad \text{(I.20)}$$

Cette loi empirique est connue sous le nom de la formulation de Darcy-Brinkman. Le premier terme de droite de l'équation est le terme de Darcy et le deuxième et appelé le terme de Brinkman. Brinkman justifie cette loi empirique par le fait que, pour les faibles valeurs de la perméabilité k, l'équation dégénère en loi de Darcy, et lorsque la perméabilité tend vers l'infini, on retrouve l'équation de Stokes. La difficulté dans l'utilisation de ce modèle réside dans l'évaluation de la viscosité équivalente μ_{eff}.**[29]**

II.7.4-Modèle général :

On généralise les trois dernières équations en introduisant un terme transitoire et le terme convectif($\vec{V}\vec{\nabla})\vec{V}$ ce qui conduit à l'équation suivante :

$$\frac{\rho}{\varepsilon}\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2}(\bar{v}\,\nabla)\bar{v} = -\nabla P + \rho g - \frac{\mu}{\kappa}\bar{v} + \frac{b\rho}{\sqrt{\kappa}}|\bar{v}|\,\bar{v} + \mu\, eff\, \nabla^2 \bar{v} \qquad (I.21)$$

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.**[32]**

II.8-Les Régimes d'écoulements de milieux poreux :

II.8.1-Régime laminais STOCKES :

l'écoulement laminaire est le mode d'écoulement d'un fluide où l'ensemble du fluide s'écoule plus ou moins dans la même direction, sans que les différences locales se contrarient (par opposition au régime turbulent, fait de tourbillons qui se contrarient mutuellement).**[37]**

$R_{ep} < 1$ *avec :* $\qquad R_{ep} = \frac{U_T . dp\, \rho f}{\mu_f}$ (I.22)

II.8.2-Régime intermédiaire de VAN ALLEN :

un régime intermédiaire se caractérise par la suprématie de l'organisation politique passant par une alliance entre les classes moyennes inférieures ou petite bourgeoisie et les paysans riches.**[38]**

$$1 < R_{ep} < 10^3 \qquad (I.23)$$

II.8.3-Régime turbulent de NEWTON :

Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.**[39]**

$$10^3 < R_{ep} < 4.10^5 \quad \text{(I.24)}$$

Partie III-FLUIDE NON NEWTONIEN

III.1-Introduction :

Un fluide est une matière parfaitement déformable. Cela comprend les gaz, les liquides, même certains solides. Les fluides existants sont nombreux et nous entourent au quotidien. Les fluides, tels que l'eau, sont des fluides newtoniens. Cela veut dire que nous pouvons facilement prédire leurs mouvements. Cependant, nous observons que d'autres fluides qui nous entourent ont des comportements très divers et étonnants. Le dentifrice, par exemple, ne veut pas sortir de son tube tant qu'on ne le soumet pas à une pression suffisante. Il en est de même pour le ketchup, qui devient tout d'un coup très liquide et jaillit de la bouteille. Ce genre de fluides on les appelle des fluides non-newtoniens. Ce sont des fluides plus complexes, car ils possèdent une propriété particulière, qui est que leur viscosité dépend de la contrainte (force) qu'on leur applique.**[40]**

III.2-Déffintion de fluide non Newtonien :

Un fluide non-newtonien est un fluide qui ne suit pas la loi de viscosité de Newton, c'est-à-dire une viscosité constante indépendante de la contrainte. Dans les fluides non-newtoniens, la viscosité peut changer lorsqu'elle est soumise à une force pour devenir plus liquide ou plus solide. Le ketchup, par exemple, devient plus coulant lorsqu'il est secoué et est donc un fluide non-newtonien. De nombreuses solutions salines et polymères fondus sont des fluides non-newtoniens, tout comme de nombreuses substances couramment rencontrées telles que crème_anglaise, miel , dentifrice, suspensions d'amidon, amidon de maïs, peinture, sang, beurre fondu et shampooing.**[41]**

III.3-Déffintion de fluide Newtonien :

Un fluide est dit newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses est une fonction linéaire du tenseur des déformations. Le facteur de proportionnalité se nomme viscosité et celle-ci est indépendante du taux de cisaillement . Pour la plupart des fluides usuels dans des conditions standards, ce modèle est très satisfaisant.

Pour ce type de fluide, l'équation d'évolution est une équation de Navier-Stokes. Pour donner un exemple, dans le cas d'un fluide incompressible et homogène (à masse volumique constante), cette équation s'écrit, dans sa version massique**[24]** :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\overrightarrow{grad})\vec{v} = -\frac{\overrightarrow{grad}\, p}{\rho} + \overrightarrow{f_m} + \nu \Delta \vec{v} \qquad \text{(I.25)}$$

$\vec{v}$: est le vecteur vitesse,

ρ : la masse volumique ;

p : la pression ;

f : sont des forces par unité de masse ;

V : est la viscosité cinématique.

III.4-classification des comportements de fluide non Newtonien :

Un fluide non-Newtonien est un fluide dont la courbe d'écoulement (contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement) est non linéaire ou ne passe pas par l'origine, autrement dis lorsque la viscosité apparente (la contrainte de cisaillement divisée par le taux de cisaillement) n'est pas constante à une température et à une pression données, mais dépend des conditions de l'écoulement telles que la géométrie, le taux de cisaillement, etc. **[42]**

- Fluide indépendants du temps :le comportement rhéologique est indépendant de l'histoire mécanique antérieure de l'échantillon.
- Fluide dépendants du temps :le comportement rhéologique dépend en autre de la durée de cisaillement et de l'histoire de l'échantillon.

III.5-Comportement indépendant du temps :

Le comportement d'écoulement de cette classe de matériaux peut être décrit par la relation constitutive de la forme suivante**[42]**:

$$\dot{\gamma}_{yx} = f(\zeta_{yx}) \qquad \text{(I.26)}$$

III.5.1 -Fluides rhéofluidifiants ou pseudo plastiques :

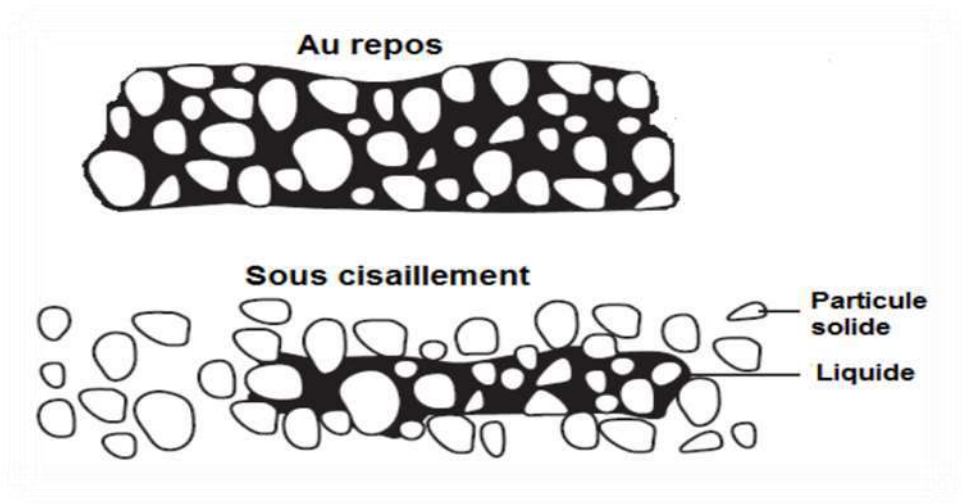
C'est le type de comportement de fluide non-Newtonien indépendant du temps le plus commun, il est caractérisé par une viscosité apparente qui diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. À la fois à des vitesses de cisaillement très faibles et très élevées.**[42]**

III.5.2-Fluides viscoplastiques :

Ce type de fluide se comporte comme un solide sous des conditions statiques. Une certaine quantité de force doit être appliquée au fluide avant qu'il n'y ait écoulement. Ce fluide est caractérisé donc par l'existence d'une contrainte-seuil (τ_0) qui doit être dépassée avant que le fluide ne s'écoule. Une fois la contrainte externe appliquée au fluide dépasse τ_0, la courbe d'écoulement peut être linéaire ou non linéaire mais ne passe pas par l'origine.**[42]**

III.5.3-Fluides rhéoépaississant ou dilatant :

Ce type de fluide présente une viscosité croissante avec une augmentation du taux de cisaillement. Bien que plus rare que la pseudo plasticité, la dilatance est observée dans les fluides contenant un haut taux de solides dé floculés (séparés qui étaient précédemment associés), comme les boues d'argile, les composés sucrés, la fécule de maïs dans l'eau et l'eau sablonneuse. Une explication possible de leur comportement dilatant est la suivante: au repos, le taux de porosité est minimal et le liquide présent est suffisant pour remplir les espaces vides. À faible taux de cisaillement, le liquide lubrifie le mouvement de tous les particules solides et les contraintes résultantes sont par conséquent faibles. D'autre part, à des vitesses de cisaillement élevées, le matériau se dilate légèrement de sorte qu'il n'y a plus de liquide suffisant pour combler les espaces vides créés. La conséquence est une augmentation du frottement et des contraintes de cisaillement résultant des contacts solides-solides entre particules (comme le montre schématiquement la figure I.12). Ce mécanisme amène la viscosité apparente à augmenter rapidement avec un taux croissant de cisaillement.**[42]**



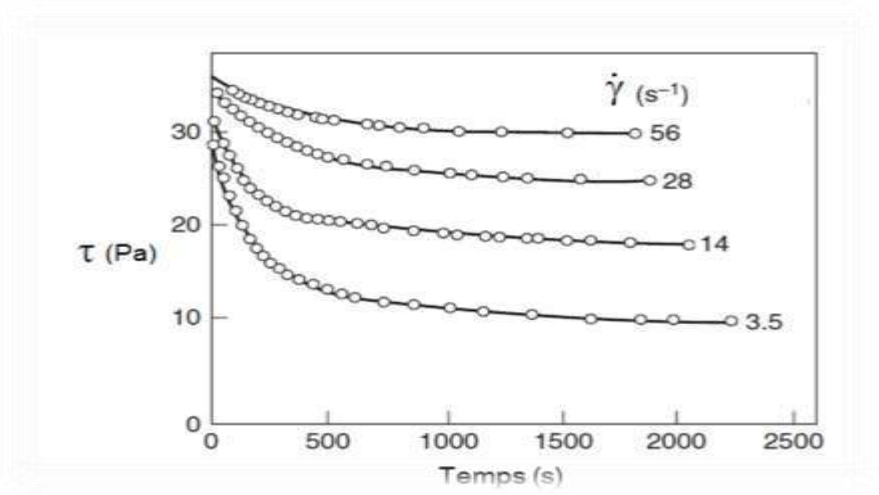
Figure(I.12) : Représentation schématique du comportement dilatant.

III.6-Comportement dépendant du temps :

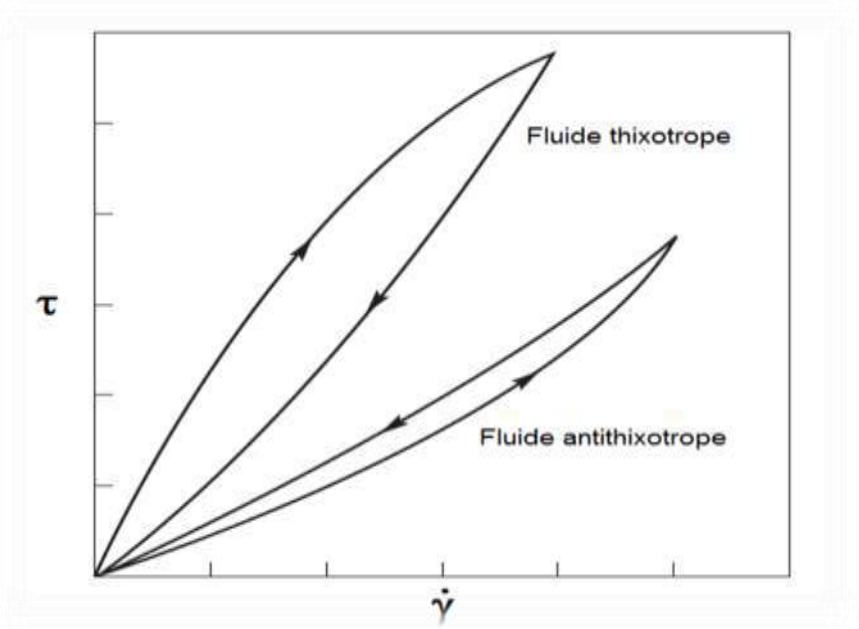
En pratique, la viscosité apparente peut dépendre non seulement du taux de cisaillement, mais aussi du temps pendant lequel le fluide a été soumis à un cisaillement. Le comportement dépendant du temps peut être subdivisé en deux catégories: la thixotropie et la rhéopexie.**[42]**

III.6.1 -Thixotropie :

Un fluide thixotrope subit une diminution de viscosité avec le temps, lorsqu'il est soumis à un cisaillement constant, comme on peut le voir sur la figure I.13 Si la courbe d'écoulement ($\tau=f(\dot{\gamma})$) est réalisée dans une seule expérience dans laquelle on augmente régulièrement la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ de zéro à une certaine valeur maximale, puis on la diminue progressivement pour atteindre zéro une boucle, d'hystérésis est obtenue de la forme représentée sur la figure I.14 Ce cycle d'hystérésis est provoqué par la diminution de la viscosité du fluide avec l'augmentation du temps de cisaillement. Ce type d'effet peut être, ou ne pas être, réversible; certains fluides thixotropes, si on les laisse reposer un moment, récupèrent leur viscosité initiale, alors que d'autres ne la retrouvent jamais. D'une manière générale, plus la zone à l'intérieur de la boucle est grande, plus le comportement dépend du temps du matériau est fort. Ainsi, aucune boucle d'hystérésis n'est observée pour les fluides au comportement indépendants du temps, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de zone à l'intérieur de la boucle.**[42]**



Figure(I.13) : Courbes représentatives montrant la thixotropie dans une suspension de boue rouge.



Figure(I.14) : Représentation schématique de la courbe $\tau = f(\dot{\gamma})$ pour le comportement dépendant du temps.

III.6.2-Rhéopexie ou antithixotropie :

C'est essentiellement le comportement opposé du comportement thixotrope, en ce sens que la viscosité du fluide augmente avec le temps lorsqu'il est soumis à un taux de cisaillement constant. Les fluides rhéopectiques sont assez rares. Encore une fois, des effets d'hystérésis sont observés dans la courbe d'écoulement.**[42]**

Conclusion :

Bien que l'étude des phénomènes de transferts (transferts de chaleur et transfert de masse) en milieu poreux soit encore en pleine évolution , avec la considération de problèmes de plus en plus complexes ou nouveaux , le chercheur dispose d'un ensemble de connaissances (résultats et modèles) et d'outils expérimentaux et numériques permettant des prédictions satisfaisantes pour un grand nombre de problèmes. Il s'agit principalement des connaissances acquises sur les écoulements et transferts conductifs et convectifs . aussi bien du point de vue théorique qu'expérimentale , l'exploitation de ces connaissances se heurte cependant encore souvent , non seulement aux difficultés de détermination des propretés de transfert effectives et des coefficients optiques , mais également aux difficultés associées à la mesure locale d'un grand nombre de variables.

Chapitre II : Formulation Mathématique

II.1-modélé physique et mathématique :

Il s'agit d'étudier le problème bidimensionnel de la convection thermosolutale induite par les forces de volume d'origine thermique et solutale dans une couche poreuse actives de largeur et de longueur ,saturée de fluide non newtonien d'amincissement par cisaillement. Les conditions aux limites de Neumann sont appliquées pour la température et la concentration sur la parois actives de la couche ,tandis que les autres parois est isolée et imperméable .le milieu poreux est supposé isotrope et homogène.

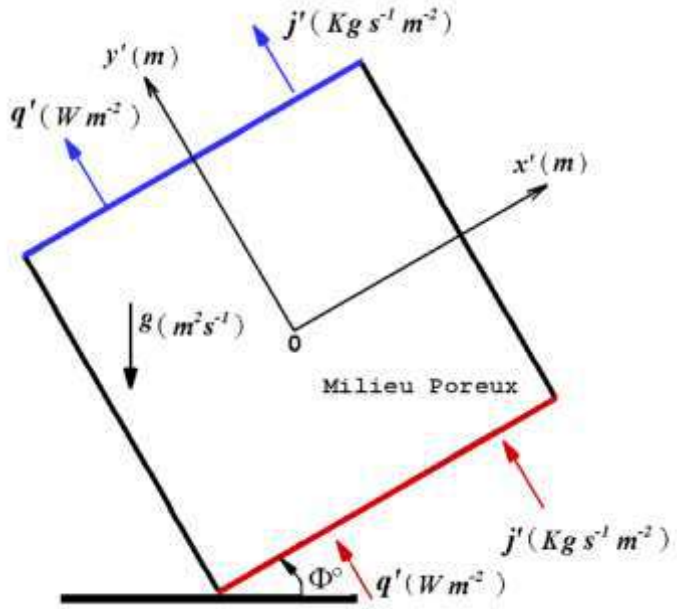


Figure (II.1) : Modèle physique et système de coordonnée.

La dissipation visqueuse du fluide est négligée et les propriétés physiques sont supposées indépendantes de la température et de la concentration sauf la densité en terme de flottabilité

qui obéit à l'approximation de Boussinesq. La variation de densité avec la température et la concentration est décrite par l'équation suivante :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta_T (T'-T_0') - \beta_s (S' - S_0')] \qquad \text{(II.1)}$$

Où β_T et β_S sont respectivement le coefficient de dilatation thermique et de concentration, ρ_0 étant la densité du mélange fluide à la température et à la concentration, laquelle température et concentration à l'origine du système de

II.2-Équations générales :

L'analyse de la convection thermique se fonde sur l'application des trois lois fondamentales de la physique générale :

- **Équation de conservation de la masse (équation de continuité) :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,(\rho\,\vec{V}) = 0 \qquad \text{(II.2)}$$

- **Équation de la conservation de la quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V}\,\overrightarrow{grad}\,\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\overrightarrow{grad}\,P + v\,\Delta\vec{V} - \vec{g}\,\beta\,(T - T_f) \qquad \text{(II.3)}$$

- **Équation de la conservation de l'énergie :**

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\,\overrightarrow{grad}\,T\right) = \beta T\left(\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V}\,\overrightarrow{grad}\,P\right) + P_S + \varphi + div\,(K\overrightarrow{grad}\,T) \qquad \text{(II.4)}$$

II.3-hypothéses simplificatrices :

La modélisation du système étudie prend en considération les hypothèses suivantes :

- ✓ L'écoulement est bidimensionnel.
- ✓ Le fluide est newtonien et incompressible.
- ✓ L'écoulement engendré est laminaire.
- ✓ le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- ✓ Les propriétés physiques du fluide sont constantes hormis la masse volumique qui obéit à l'approximation de Boussinesq dans le terme de la poussée d'Archimède.

II.4 - formulation mathématique :

En utilise la loi de Darcy et l'approximation de Boussinesq, les équations exprimant la conservation des équilibres de quantité de mouvement , d'énergie et de soluté sont données par**[24]** :

$$\nabla^2 \Psi' = -\frac{gk\,\beta_T}{v}\frac{\partial}{\partial x'}\left\{T' + \frac{\beta_s}{\beta_T}\,S'\right\} \qquad \text{(II.5)}$$

$$((\rho C)_p\frac{\partial T'}{\partial t'} + (\rho C)_f\,v'.\nabla T' = k\,\nabla^2 T' \qquad \text{(II.6)}$$

$$\Phi \frac{\partial S'}{\partial t'} + v' . \nabla S' = D\nabla^2 S' \quad \text{(II.7)}$$

V' :la vitesse de Darcy,

g : l'accélération gravitationnelle,

V: la viscosité cinématique,

$(\rho C)_p$ et $(\rho C)_f$: sont respectivement la capacité calorifique du milieu poreux saturé et du fluide,

k : la conductivité thermique,

D : la diffusivité massique des espèces à travers le milieu poreux saturé de fluide,

Φ : la porosité du milieu poreux,

Ψ' : la fonction de flux est définie de telle sorte que :$u' = \partial\Psi'/\partial y'$ *et* $v' = -\partial\Psi'/\partial x'$

Le modèle Carreau-Yasuda donné par :

$$\frac{\mu-\mu_\infty}{\mu_0-\mu_\infty} = [1 + (\lambda'\dot{\gamma}')^a]^{(n-1)/a} \quad \text{(II.8)}$$

Afin de simplifier le problème et de généraliser les résultats, les variables non dimensionnelles suivantes sont utilisées :

$$(x, y) = \frac{(x', y')}{H'}, \; t = \frac{t'\alpha}{\sigma H'^2}, \; (u, y) = \frac{(u', v')\, H'}{\alpha}, \; \Psi = \frac{\Psi'}{\alpha}, \; \varepsilon = \phi/\sigma, \; P = P'/P^*,$$

$$P^* = \frac{P_r}{D\alpha}\, r\, oU^{*2}, \; T = \frac{(T' - T_0')}{\Delta T^*}, \; S = \frac{(S' - S_0')}{\Delta S^*}, \; \Delta T^* = \frac{q'H'}{k}, \; \Delta S^* = \frac{j'H'}{\rho_0 D}, \quad \text{(II.9)}$$

$$\mu_{CY} = \frac{\mu}{\mu_0}, \; \lambda_{CY} = \frac{\lambda'\alpha}{\varepsilon H^{*2}}$$

Les équations gouvernantes sans dimension , équations (II.2)-(II.4) , écrites en termes de fonction de flux , de température et de concentration , sont les suivantes :

$$\frac{d}{dx}\left(\mu_{CY}\ \frac{d\Psi}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(\mu_{CY}\ \frac{d\psi}{dy}\right) = -R_T\left(\frac{\partial T}{\partial X}\ \varphi\ \frac{\partial S}{\partial y}\right) \quad \text{(II.10)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial y} = \nabla^2 T \qquad \text{(II.11)}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial y}\frac{\partial S}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y} = L_e^{-1}\,\nabla^2 S \qquad \text{(II.12)}$$

Le comportement du fluide non newtonien est décrit par le modèle constitutif phénoménologique Carreau-Yasuda où la viscosité (μ_{Cy}) est donné par :

$$\mu_{CY}(\dot{\gamma}) = s + (1-s)\,[1 + (\lambda_{CY}\ |\dot{\gamma}|)^a\ ]^{(n-1)/a} \qquad \text{(II.13)}$$

μ_{CY} : la viscosité apparente dépendant du cisaillement sans dimension,

$S=\mu_\infty/\mu_0$: le rapport des viscosités du taux de cisaillement infini au taux de cisaillement nul ,

$\dot{\gamma}$: le taux de déformation .

Défini par cette équation :

$$\dot{\gamma} = 4[(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x\,\partial y})^2 + (\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2})^2]^{1/2} \qquad \text{(II.14)}$$

II.5- conditions aux limites :

les conditions aux limites sans dimension correspondantes appliquées aux parois du système**[24]** sont :

$$x=\pm\frac{1}{2}\,,\ u=\Psi=0\,, \quad \text{et} \quad y=\pm\frac{1}{2}\,,\ v=\Psi=0 \qquad \text{(II.15)}$$

$$x=\pm\frac{1}{2}\,,\ \frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial S}{\partial y}=0 \quad \text{et} \quad y=\pm\frac{1}{2}\,,\ \frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial S}{\partial y}=-1 \qquad \text{(II.16)}$$

II.6- calcul du coefficient de transfert de chaleur et de masse :

Les taux de transfert de chaleur et de masse à n'importe quelle section , x , est exprimé en termes de Nusselt , Nu , et Sherwood , Sh , nombres définis comme :

$$Nu^{-1} = \Delta T = T_{(0,-\frac{1}{2})} - T_{(\frac{0.1}{2})} \qquad \text{(II.17)}$$

$$Sh^{-1} = \Delta T = S_{(0,-\frac{1}{2})} - S_{(\frac{0.1}{2})} \qquad \text{(II.18)}$$

Les nombres moyens de Nusselt et Sherwood sont calculés en utilisant l'intégrale suivante :

$$Nu_m = \int_{-1/2}^{1/2} Nu\, dx \tag{II.19}$$

$$Sh_m = \int_{-1/2}^{1/2} Sh\, dx \tag{II.20}$$

Conclusion :

Une fois les équations régissant le problème physique posé , avec les conditions aux limites associées , sont mises sous leurs formes adimensionnelles , et étant donné leur présentation sous forme d'équations aux dérivées partielles qui ne peuvent prétendre à une résolution analytique directe , nous avons donc opté pour une résolution numérique. Celle -ci permettra de transformer les équations aux dérivées en équations algébriques . Ceci fera l'objet du prochain chapitre, nous présentons la résolution numérique de notre modèle mathématique.

Chapitre III : Analyse et Méthode Numérique

Approximation des dérivées par des différence finies :

Nous avons vu au chapitre précédent qu'un problème aux dérivés partielles nécessite la donnée :

*d'un domaine D

*d'une équation aux dérivées partielles (E.D.P)

*de conditions aux limites

*de conditions initiales (pour les problèmes d'évolution)

Pour obtenir une approximation numérique de la solution de ce problème nous devons approcher les dérivées partielles de L'E.D.P en chaque nœud du domaine discrétisé (maillage) en utilisant les valeurs de la variable dépendante en ce nœud et aux nœuds avoisinants.**[43]**

III.1-Discretisation du domaine :

Les calcule par différences finies sont effectués suivant un maillage Obtenu par un double réseau de parallèles aux axes et régulièrement espacés. L'intersection de 2 droites du maillage définit un nœud M de cordonnées (X_M, y_M). Si les parallèles à l'axe x sont espacées de $\Delta X = h$ et les parallèles à L'axe y de $\Delta y = k$, le nœud a comme coordonnées $X_M = i\ \Delta_X = i\ h$,et $y_M = j\ \Delta_y = j\ k$ ou d'une manière condensée (i, j). Ainsi la fonction $U\ (x\ , y\ )$ prend au point$M$ (x_M , y_M) la valeur $U(i\ \Delta x\ , j\ \Delta y\ ) = U\ (i\ h\ , j\ k)$ ou $U_{i,j}$ ou U_i^j ou même $U_{i,j}$ **[43]**

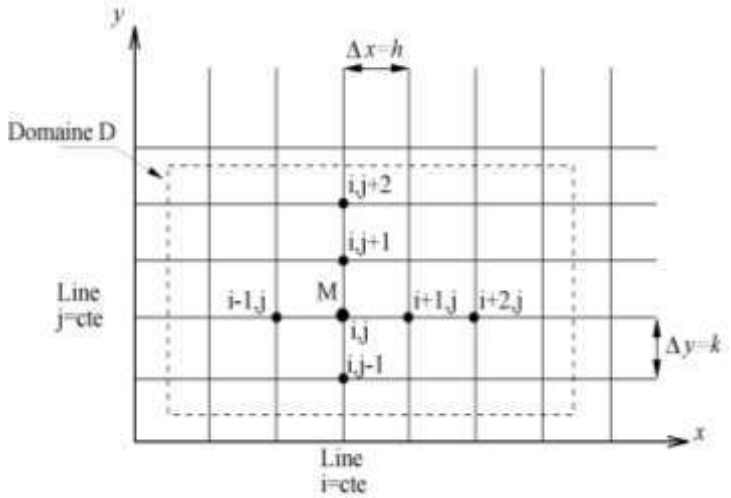


Figure (III.1) : Maillage.

III.2-Approximation des dérivées :

Soit $U(x,y)$ une fonction de deux variables indépendantes que nous supposerons suffisamment différentiable. Si nous écrivons son développement en séries de Taylor en un point**[43]**

$$(x+h,y+k) = U(x,y) + h\frac{\partial U}{\partial x}(x,y) + k\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{h^2}{2!}\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}(x,y) + \ldots\ldots + \frac{1}{(n-1)!}\left[h\frac{\partial}{\partial x}+k\frac{\partial}{\partial y}\right]^{(n-1)} U(x,y) + R_n \quad \text{(III.1)}$$

Avec le résidu R_n donné par :

$$R_n = \frac{1}{n!}\left[h\frac{\partial}{\partial x}+k\frac{\partial}{\partial y}\right]^n U(x+\xi h, y+\eta k) \quad \text{(III.2)}$$

$\xi \in]0,1[$, $\eta \in]0,1[$

Ou encore $$R_n = O\left[(|h|+|k|)^n\right] \quad \text{(III.3)}$$

L'équation (2.3) signifie qu'il existe un nombre positif constant M tel que

$$|R_n| \leq M\,(|h|+|k|)^n$$

Le nœud $(i\Delta x, j\Delta y)$ est entouré par les nœuds avoisinants montrés sur la figure 2.1. En développant en séries de Taylor pour $U_{i-1,j}$, $U_{i+1,j}$, $U_{i-2,j}$, $U_{i+2,j}$ autour de la valeur centrale $U_{i,j}$, nous obtenons :

$$U_{i-1,j} = U_{i,j} - h\,U_x + \frac{h^2}{2!}U_{xx} - \frac{h^3}{3!}U_{xxx} + \frac{h^4}{4!}U_{xxxx} + R_5 \quad \text{(III.4)}$$

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} + h\,U_x + \frac{h^2}{2!}U_{xx} + \frac{h^3}{3!}U_{xxx} + \frac{h^4}{4!}U_{xxxx} + R'_5 \quad \text{(III.5)}$$

$$U_{i-2,j} = U_{i,j} - 2h\,U_x + 2h^2\,U_{xx} - \frac{8}{6}h^3\,U_{xxx} + \frac{2}{3}h^4\,U_{xxxx} + R''_5 \quad \text{(III.6)}$$

$$U_{i+2,j} = U_{i,j} + 2h\,U_x + 2h^2\,U_{xx} + \frac{8}{6}h^3\,U_{xxx} + \frac{2}{3}h^4\,U_{xxxx} + R'''_5 \quad \text{(III.7)}$$

Ici $U_x = \frac{\partial U}{\partial x}$; $U_{xx} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$, etc…et toutes les dérivées sont évaluées au nœud (i,j) .

III.2.1-Approximation à l'ordre 1 en h de la dérivée première :

En négligeant les termes d'ordre 2 et plus dans les équations (III.4) et (III.5) nous obtenons :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h} + O(h) \qquad \text{(III.8)}$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{h} + O(h) \qquad \text{(III.9)}$$

Nous avons donc approché U_x par des différences finies d'ordre 1 progressives (ou à droite) et régressives (ou à gauche) respectivement.**[43]**

III.2.2- Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivée première par les différences centrées :

En soustrayant (III.4) de (III.5) et en négligeant les termes d'ordre 4 et plus nous obtenons**[43]** :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2\,h} + O(h^2) \qquad \text{(III.10)}$$

C'est l'approximation de U_x par des différences finies centrées d'ordre 2 .

III.2.3- Approximation à l'ordre 1 en h de la dérivées seconde :

En multipliant l'équation (III.5) par (-2) , en ajoutant le résultat à l'équation (III.7) et en négligeant les termes d'ordre 3 et plus , nous obtenons :

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - 2\,U_{i+1,j} + U_{i+2,j}}{h^2} + O(h) \qquad \text{(III.11)}$$

C'est l'approximation de la dérivée seconde à l'ordre 1 en h par les différences à droite. De même , en utilisant les équations (III.4) et (III.6) , nous obtenons l'approximation à l'ordre 1 en h de U_{xx} par les différences à gauche**[43]** :

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - 2\,U_{i-1,j} + U_{i-2,j}}{h^2} + O(h) \qquad \text{(III.12)}$$

III.2.4-Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivée seconde :

En ajoutant les équations (III.4) et (III.5) et en négligeant les termes d'ordre 4 et plus, nous obtenons :

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - 2\,U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} + O\,(h^2) \qquad \text{(III.13)}$$

C'est l'approximation de la dérivée seconde à 2 en h par les différences centrées.**[43]**

III.2.5-Approximation à l'ordre 2 en h de la dérivées première par les différences à droite ou à gauche :

De l'équation (III.5) nous pouvons tirer :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h} - \frac{h}{2} U_{xx}|_{i,j} - \frac{h^6}{6} U_{xxx}|_{i,j} + O\,(h^3) \qquad \text{(III.14)}$$

En substituant pour $U_{xx}|_{i,j}$ de l'équation (III.11) nous obtenons :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{-3\,U_{i,j} + 4\,U_{i+1,j} - U_{i+2,j}}{2\,h} + O\,(h^2) \qquad \text{(III.15)}$$

C'est l'approximation à l'ordre 2 en h de la dérivée première U_x par les différences à droite[43].

De même en utilisant les équations (III.4) et (III.12), nous obtenons l'approximation à l'ordre 2 en h de U_x par les différences à gauche :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j} = \frac{3\,U_{i,j} - 4\,U_{i-1,j} + U_{i-2,j}}{2\,h} + O\,(h^2) \qquad \text{(III.16)}$$

III.2.6- Approximation de U_y et U_{yy} :

Les approximation de U_y et U_{yy} sont obtenues de la même façon que celles de U_x et U_{xx} et sont données ci-dessous**[43]** :

$$\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} + O\,(k) \qquad \text{(III.17)}$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{k} + O(k) \qquad \text{(III.18)}$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j-1}}{2\,k} + O(k^2) \qquad \text{(III.19)}$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{i,j} = \frac{-3\,U_{i,j} + 4\,U_{i,j+1} - U_{i,j+2}}{2\,k} + O(k^2) \qquad \text{(III.20)}$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{i,j} = \frac{3\,U_{i,j} + 4\,U_{i,j-1} - U_{i,j-2}}{2\,k} + O(k^2) \qquad \text{(III.21)}$$

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - 2\,U_{i,j+1} + U_{i,j+2}}{k^2} + O(k) \qquad \text{(III.22)}$$

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j} - 2\,U_{i,j-1} + U_{i,j-2}}{k^2} + O(k) \qquad \text{(III.23)}$$

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right|_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - 2\,U_{i,j} + U_{i,j-1}}{k^2} + O(k^2) \qquad \text{(III.24)}$$

III.2.7-Approximation de la dérivée croisée U_{xy} :

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial y\,\partial x}\right|_{i,j} = \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial U}{\partial x}\right]_{i,j} = \frac{\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j+1} - \left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j-1}}{2\,k} + O(k^2)$$

Or $$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j+1} = \frac{U_{i+1,j+1} - U_{i-1,j+1}}{2\,h} + O(h^2)$$ d'après (III.10)

Et $$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{i,j-1} = \frac{U_{i+1,j-1} - U_{i-1,j-1}}{2\,h} + O(h^2)$$ d'après (II.30)

donc :

$$\left.\frac{\partial^2 U}{\partial y\,\partial x}\right|_{i,j} = \left.\frac{\partial^2 U}{\partial x\,\partial y}\right|_{i,j} = \frac{1}{4\,h\,k}\left[U_{i+1,j+1} - U_{i-1,j+1} - U_{i-1,j-1} + U_{i+1,j-1}\right] + O(h + k^2)$$

(III.25)

III.2.8-Approximation à l'ordre n en h des dérivées :

En prenant un nombre de points avoisinants de plus en plus grand , on peut obtenir un nombre illimité d'autres approximations pour chaque dérivées.**[43]**

Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons exposé la procédure numérique choisie afin de calculer les transferts couplés de chaleur et de soluté dans la cavité . pour cela , on exploite la méthode de volume finis .dans le prochain chapitre nous présentons les résultats obtenus avec leurs descriptions et leurs discussions.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1-Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats suivis d'une discussion des effets des paramètres rhéologiques du modèle de Carreau-Yasuda sur la structure d'écoulement, le transfert de chaleur et l'existence de la convection sous-critique.

La simulation numérique présentée dans cette étude concerne la convection en double diffusion dans une cavité carrée remplie d'un fluide non-newtonien saturée par un milieux poreux . Dans cette étude, les résultats numériques ont été obtenus pour un nombre de Prandtl Pr=10 . Les résultats numériques sont analysés en termes de lignes de courant, isothermes, contours d'iso concentration et de viscosité apparente, fonction d'écoulement, profils verticaux de température, concentration et vitesse.

IV.2-Effet de la loi de puissance n sur la structure de l'écoulement :

La figure IV 2.1 présente les contours de la fonction de courant, de température, de concentration, et de la viscosité apparente, dans le centre de la cavité ,pour : $Ra_T = 50$, $s = 0.01$, $a = 2$, $E = 0.2$, Le= 10.

Pour la figure (IV.2. a) Dans le cas n =1, la structure de l'écoulement est de forme circulaire, ce qui correspond au problème classique de la convection thermosolutale d'un fluide newtonien, puis dans le cas de l'indice de loi de puissance diminue jusqu'à n =0,4, la forme de la structure de l'écoulement consiste en une ellipse monocellulaire étendue remplissant la totalité de la cavité et l'écoulement dans la région centrale de la cavité est essentiellement parallèle. figure (IV.2 . b) nous remarquons que si l'indice de puissance n, diminue, la température est constante, c'est-à-dire que l'indice de puissance n n'a aucun effet sur le taux de transfert de chaleur. figure (IV.2 .c. d) Lorsque nous diminuons l'indice de puissance, n, la concentration diminue progressivement, la viscosité apparente diminue avec la diminution du paramètre n de n=1 (fluide newtonien μ = 1) à n=0.4 (fluide non-newtonien), le fluide devient non-newtonien, est montré dans la figure (d).

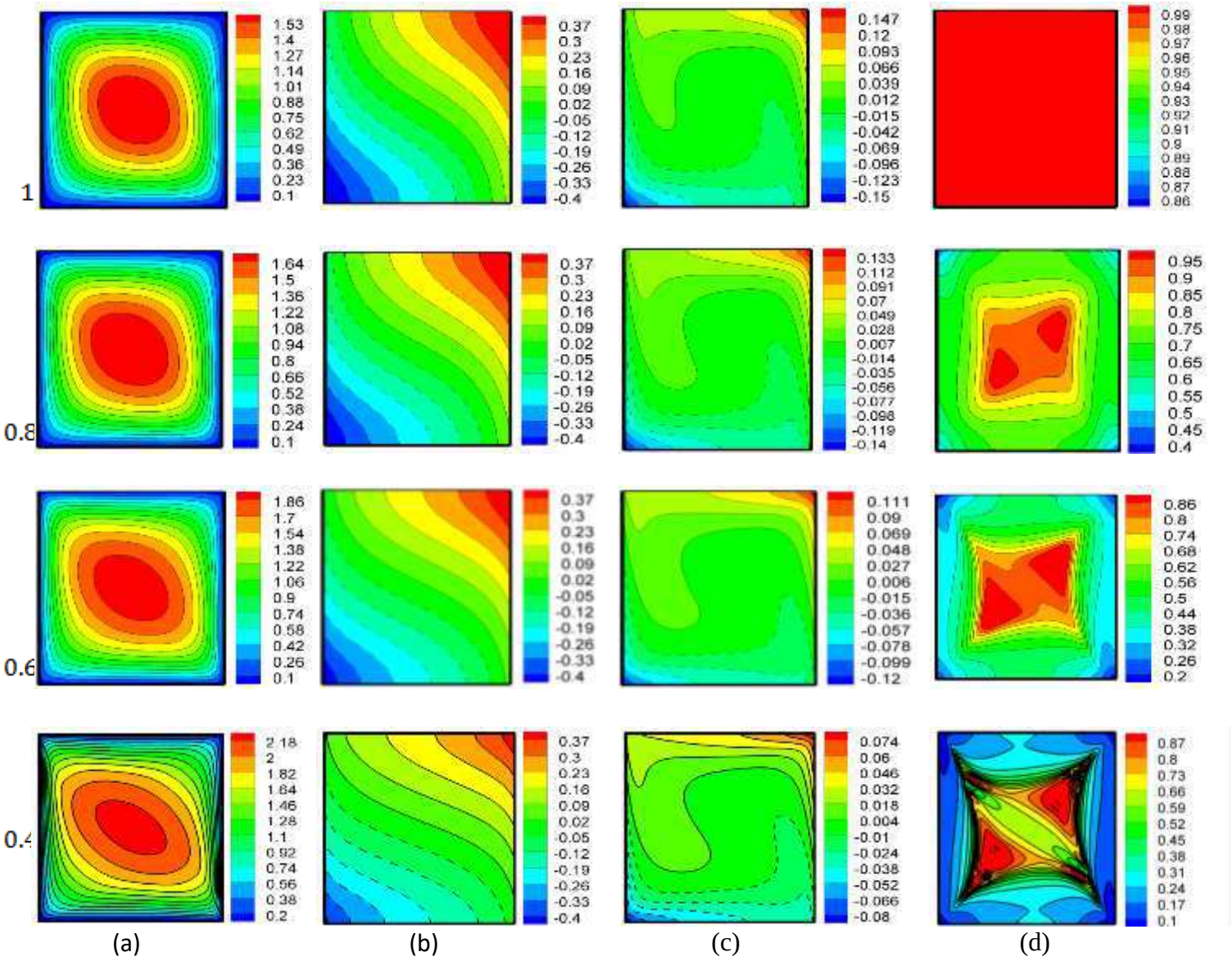


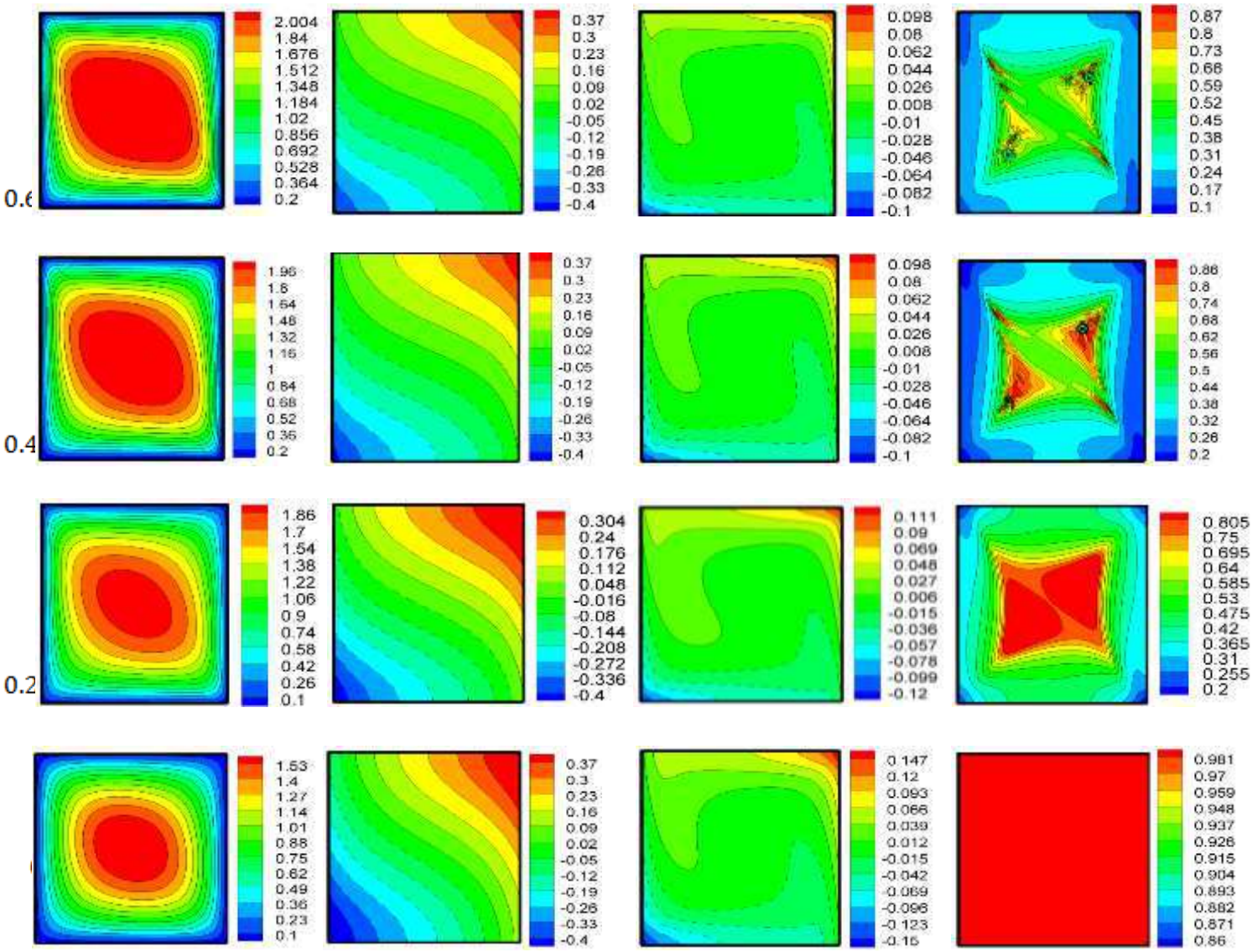
Figure (IV.1) : Représentés les contours de la fonction d'ecoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente, μ.

IV.3- Effet de le paramètre E sur la structure de l'écoulement :

La figure IV.2 présente les contours de la fonction de courant, de température, de concentration, et de la viscosité apparente, dans le centre de la cavité ,pour : $Ra_T = 50$, $s = 0.01$, $a = 2$, $n = 0.6$, Le= 10.

Pour le figure (IV.3.a) dans le cas E=0.6 , la structure d'écoulement est de forme elliptique correspondant au problème classique de la convection thermosolutale d'un fluide non-Newtonien ,puis dans le cas E=0, la forme de structure d'écoulement se compose d'un circulaire unicellulaire étendu remplissant toute la cavité et l'écoulement dans la région

centrale de la cavité est essentiellement parallèle, l'intensité de flux est diminue avec la diminution de parametre E. la figure (IV.3. b) on remarquons que si le paramètre E, augmente la température est reste constante. la figure (IV.3 .c. d) Lorsque on augmente le paramètre E. la concentration est diminué progressivement ,est la viscosité diminue , le fluide devient très visqueux avec la diminution des paramètre E .



Figure(IV.2): Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente μ.

IV.4-Effet de la concertation s sur la structure de l'écoulement :

La figure(IV.3). présente les contours de la fonction de courant, de température, de concentration, et de la viscosité apparente, dans le centre de la cavité ,pour :

$Ra_T = 50$, $E = 0.2$, $a = 2$, $n = 0.6$, Le= 10.

Pour le figure (IV.4.3. a) Dans le cas n =1, la structure d'écoulement est de forme circulaire, correspondant au problème classique de la convection thermosolutale d'un fluide Newtonien, puis dans le cas n =0, la forme de structure d'écoulement se compose d'un elliptique unicellulaire étendu remplissant toute la cavité et l'écoulement dans la région centrale de la cavité est essentiellement parallèle. la figure (IV.4.3.b) on remarquons que si l'indice de puissance n, augmente la température est reste constante, c'est-à-dire l'indice de puissance n n'est effet pas sur le taux de transfert de chaleur. la figure (IV.4.3 .c.d) Lorsque on augment de l'indice de puissance, n, la concentration est augment progressivement, on observe que le taux de transfert de masse améliorer avec augmentations de l'indice de puissance ,n. la viscosité apparente elle est augment avec la augmentation de paramètre n de n=1 (fluide Newtonien μ = 1) à n=0 (fluide non-Newtonien) est représenter sur la figure (d).

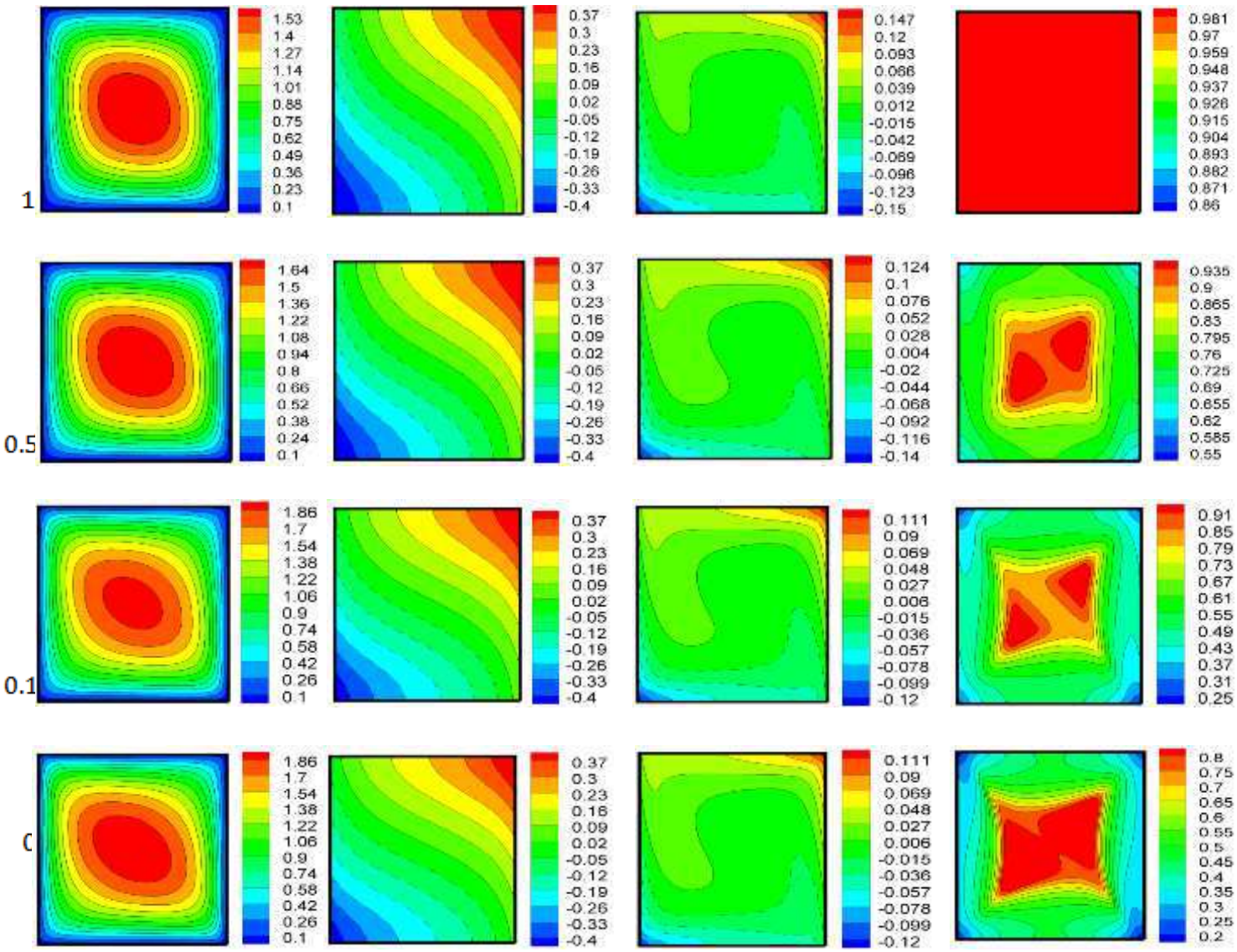
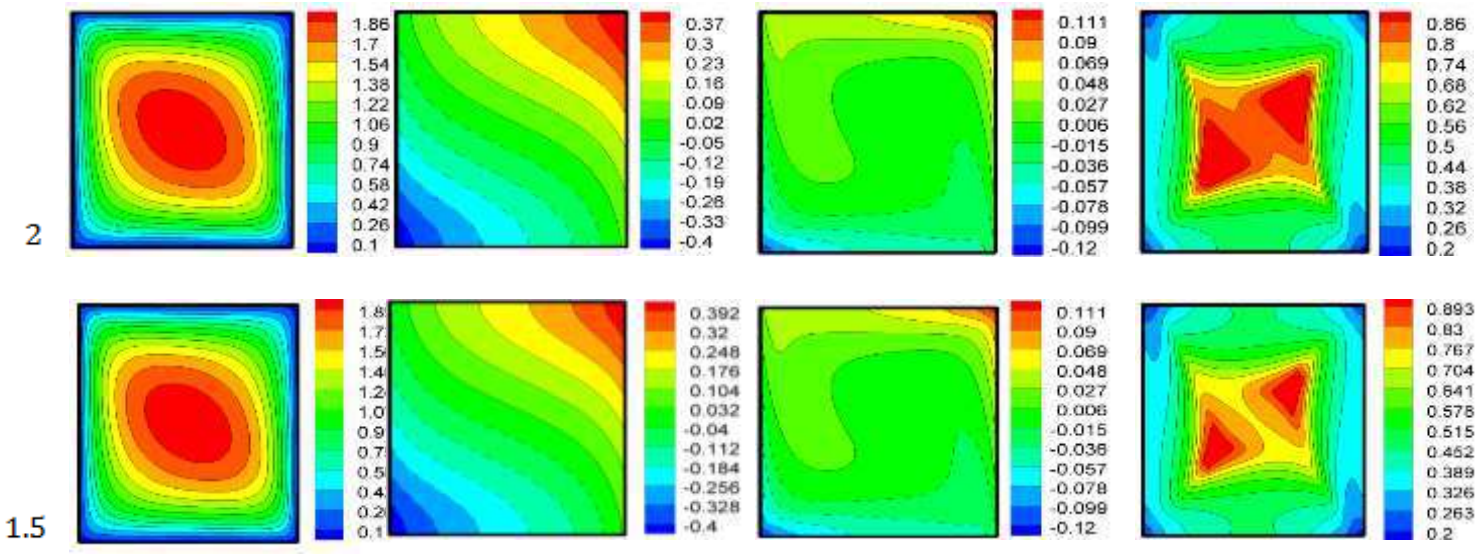


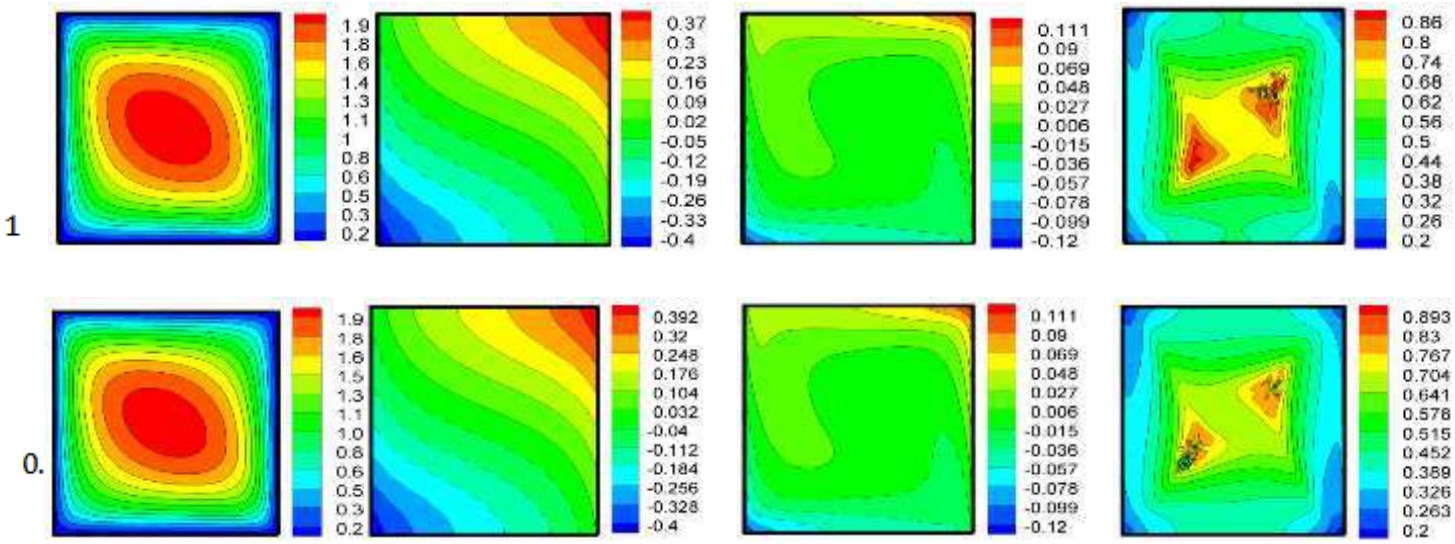
Figure (IV.3) : Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente μ .

IV.5- Effet de le paramètre a sur la structure de l'écoulement :

La figure(IV.4). présente les contours de la fonction de courant, de température, de concentration, et de la viscosité apparente, dans le centre de la cavité ,pour : $Ra_T = 50$, $s = 0.01$, $E = 0.2$, $n = 0.6$, Le= 10.

Pour la figure (IV.4.a) dans le cas E=0.6, la structure de l'écoulement est elliptique correspondant au problème classique de la convection thermosolutale d'un fluide non newtonien, puis dans le cas E=0, la forme de la structure de l'écoulement consiste en une circulaire unicellulaire étendue remplissant toute la cavité et l'écoulement dans la région centrale de la cavité est essentiellement parallèle. Dans la figure (IV.5.4.b), nous remarquons que si le paramètre a, augmente, la température varie très peu, c'est-à-dire que le paramètre a n'a aucun effet sur le taux de transfert de chaleur. figure (IV.5.4.c.d) Lorsque nous augmentons le paramètre a, la concentration reste constante, c'est-à-dire que le paramètre a n'a aucun effet sur le taux de transfert de masse.





Figure(IV.4): Représentés les contours de la fonction d'écoulement ψ, température T, concentration S, et la viscosité apparente μ .

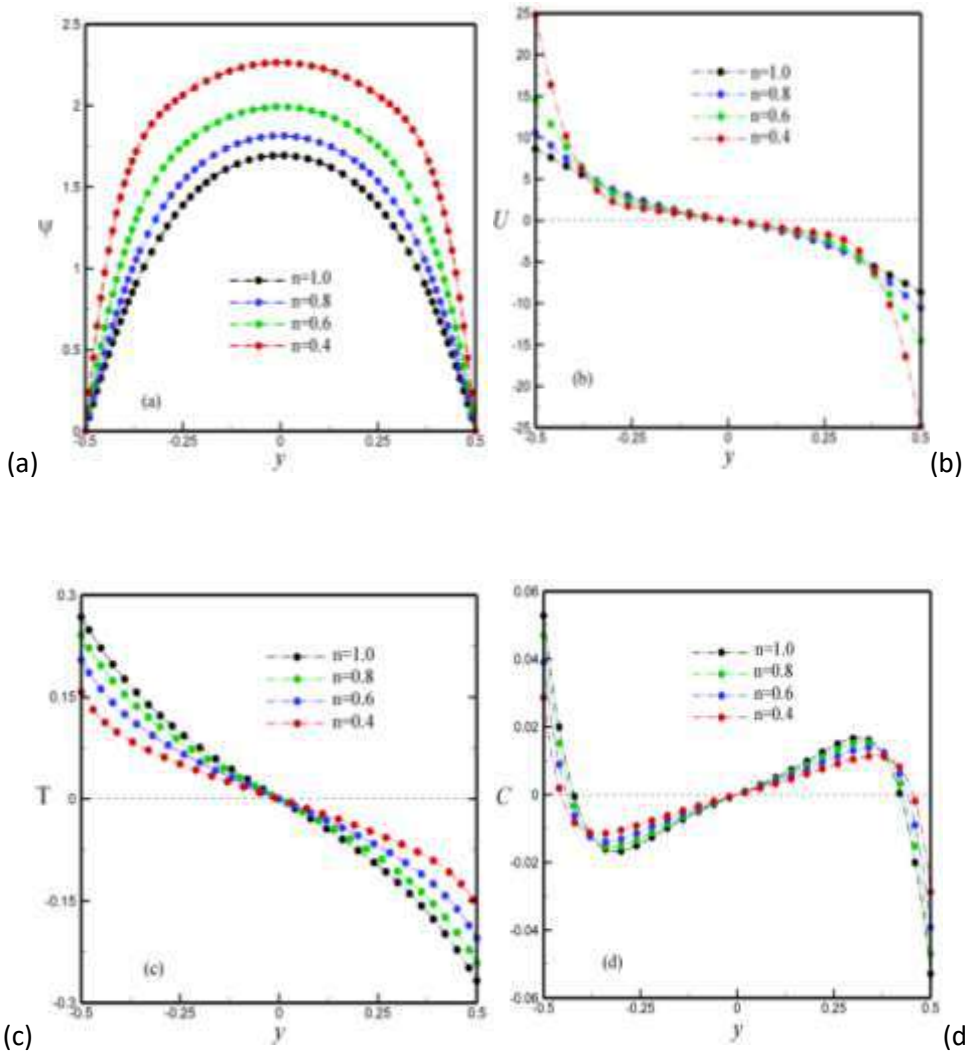
IV.6-Effet de la loi de puissance n sur les profils de la fonction de courant , de la température , de la concentration et de la vitesse :

Les analyses de cette profils , basée sur l'approximation du l'écoulement parallèle , et les solution numériques sur les profils composante de la concentration s ,le , température T , la vitesse U , respectivement . le figure (IV.6.5.(a).(d)) les résultats ont été obtenus pour Ra_T= 50 , L_e = 10 et diverses valeurs de l'indice de la loi de puissance n

A partir de ces figures(IV.6.5.(a)-(d) , il est clair que la solution d'écoulement parallèle qui est représentée présentée par des lignes et des cercles pleins . la figure (IV.6.5.a) montre que lorsque l'indice de puissance diminue, l'intensité de l'écoulement augmente et par conséquent, la circulation de l'écoulement à l'intérieur de la cavité s'accentue.

Les profils de vitesse U , sont symétriques par rapport à y . la vitesse maximale à la paroi (y = ±0,5) où l'amincissement par cisaillement est annulé car les forces de flottabilité sont égales et opposées. de plus, la vitesse U , diminue fortement à la paroi (U=U_{max}) à la paroi (y = -0,5) vers U=0 au centre de la cavité (y=0) puis retombe à (U=-U_{max}) à la paroi (y = 0,5). 5) . en augmentant la valeur de l'indice de la loi de puissance , on constate que la vitesse au voisinage des parois est considérablement réduite lorsque le fluide devient de plus en plus mince au cisaillement (n<1) . l'effet de n , sur les profils de température et de concentration

est illustré dans les figures (IV.6 .5.d.b) l'évolution des profils de température et de concentration est tout à fait similaire à celle discutée dans la figure (IV .d) lors de l'étude de l'évolution de U . on peut voir dans la figure (IV.5.c.d) que la température et la concentration près des parois solides sont favorisées avec une diminution de l'indice de loi de puissance n . De même, la différence de température (concentration) entre le long des parois verticales (y = ±0.5), permettant une augmentation significative des taux de transfert de chaleur et de masse.



Figure(IV.6.5): Effet de la loi de puissance , sur les profils, , la fonction d'écoulement Ψ (a), la vitesse U (b),la température T (d) , la concentration s (d) .

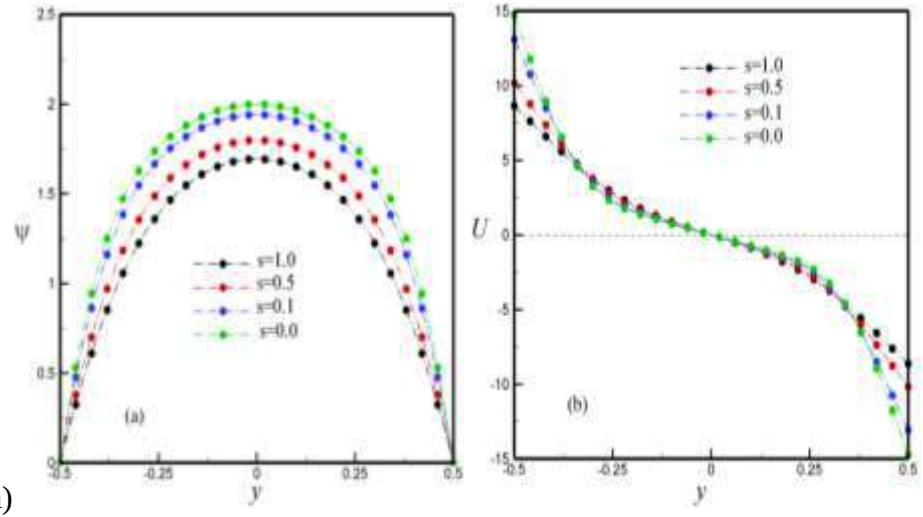
IV.7- Effet de la concentration s sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la vitesse :

Les analyses de cette profils, basée sur les solution numériques sur les profils composante de la fonction d'écoulement, concentration s ,le , température T , la vitesse$U$,

respectivement . le figure (IV.7.6.(a).(d)) les résultats ont été obtenus pour Ra_T= 50 , L_e = 10 et diverses valeurs de la concentration s .

On constate également que l'intensité de l'écoulement et le transfert de chaleur par convection sont favorisés par la diminution du paramètre s lorsque ce dernier prend des valeurs allant de s =1 (fluide Newtonien) à s=0. figure(IV.7.6.d) indique les profils de la concentration est symétrique par rapport à y.

la figure (IV.7.6.d) montre que la force du transfert de chaleur par convection est significativement amélioré lors de la augmentation de la concentration $s = 0$ (fluide non - newtonien) à $s = 1$ (fluide newtonien) on dit que la relation entre les deux c'est une relation inverse, Comme on peut l'observer, une augmentation de ce paramètre conduit à une légère amélioration de l'intensité de l'écoulement et le transfert de chaleur par convection. Cette constatation trouve son explication dans l'équation.



(a) (b)

(c) (d)

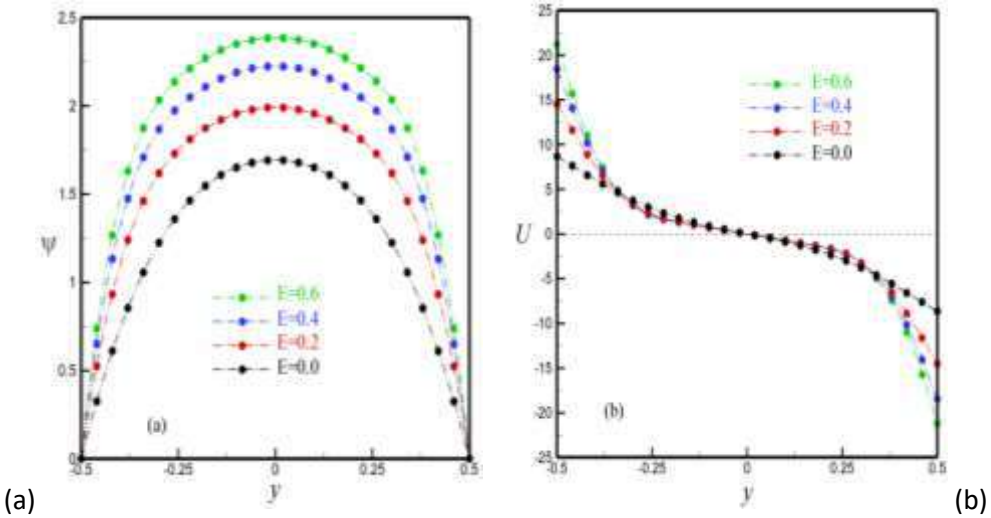
Figure(IV.7.6) : Effet de concentration s , sur les profils, la fonction d'écoulement Ψ (a), la vitesse U (b), la température T (c) , la concentration s (d) .

IV.8- Effet de la paramètre E sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la viscosité apparente :

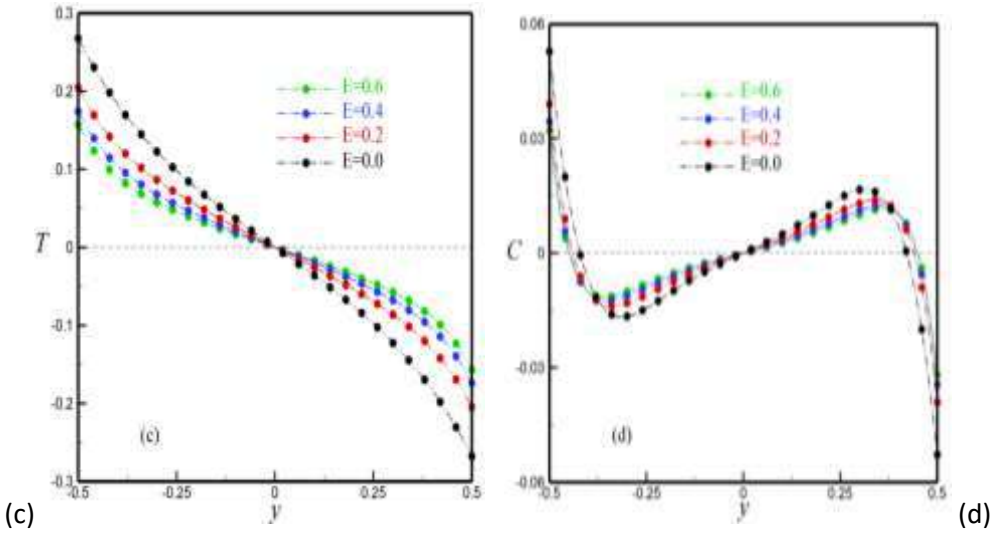
L'effet du paramètre rhéologique E sur les caractéristiques de l'écoulement et , la vitesse, la température et la concentration le est maintenant considéré pour les valeurs $n = 0.6$, $a = 2$ et s=0.01

La figure (IV.8.7.(a) – (d)) montre qu'une augmentation progressive du paramètre E améliore l'écoulement convectif à l'intérieur de la cavité, En se référant à l'équation(2.33), on remarque que lorsque $E \to \infty$ la valeur de viscosité apparente $\eta \to s$.

La figure (IV.8.7.c.d) illustre l'effet de E sur la température et la concentration, on remarque que la température et la concentration est diminué de manière significative avec la diminution de E.



(a) (b)



(c) (d)

Figure(IV.8.7) : Effet de paramètre E sur le profils , ,la fonction d'écoulement Ψ (a) , la vitesse U (b) , la température T(c) , la concentration s(d).

IV.9- Effet de paramètre a sur les profils de la fonction de courant , de la température , la loi de puissance et de la viscosité apparente :

Les analyses de cette profils , basée sur l'approximation du l'écoulement parallèle , et les solution numériques sur les profils composante de la concentration s , température T , la vitesse U , respectivement . le figure (IV.9.8..(a)-(d)) les résultats ont été obtenus pour Ra_T= 50 , L_e = 10 et diverses valeurs de la paramètre a , le figure (IV.9.8.d)) indique les profils de la concentration est symétrique par rapport à y. on voit que chaque fois qu'augment le paramètre a la concentration est reste constante. C'est-à-dire le paramètre a n'est effet pas sur le taux de transfert de masse. la figure (IV.9.8.a) représente les résultat de la fonction d'écoulement Ψ par rapport le paramètre a ,on voit que chaque fois augment la paramètre a la fonction d'écoulement diminué progressivement , donc la relation entre les deux c'est une relation inverse, c'est-à-dire le paramètre a est effet très faible sur la fonction d'écoulement Ψ la figure (IV.9.8.c) montre que les résultat de température par rapport le paramètre a , on regarde chaque fois augment le paramètre a la température il diminue très petite pourcentage ,alors la relation entre les deux paramètre c'est une relation inverse , c'est-à-dire le paramètre a est un effet très petite sur le taux de chaleur . la figure (IV.9.8.b) montre que les résultat de la vitesse U par rapport le paramètre a,on voit que chaque fois augment le paramètre a la vitesse reste constant ,c'est-à-dire le paramètre a n'est effet pas sur la vitesse U .

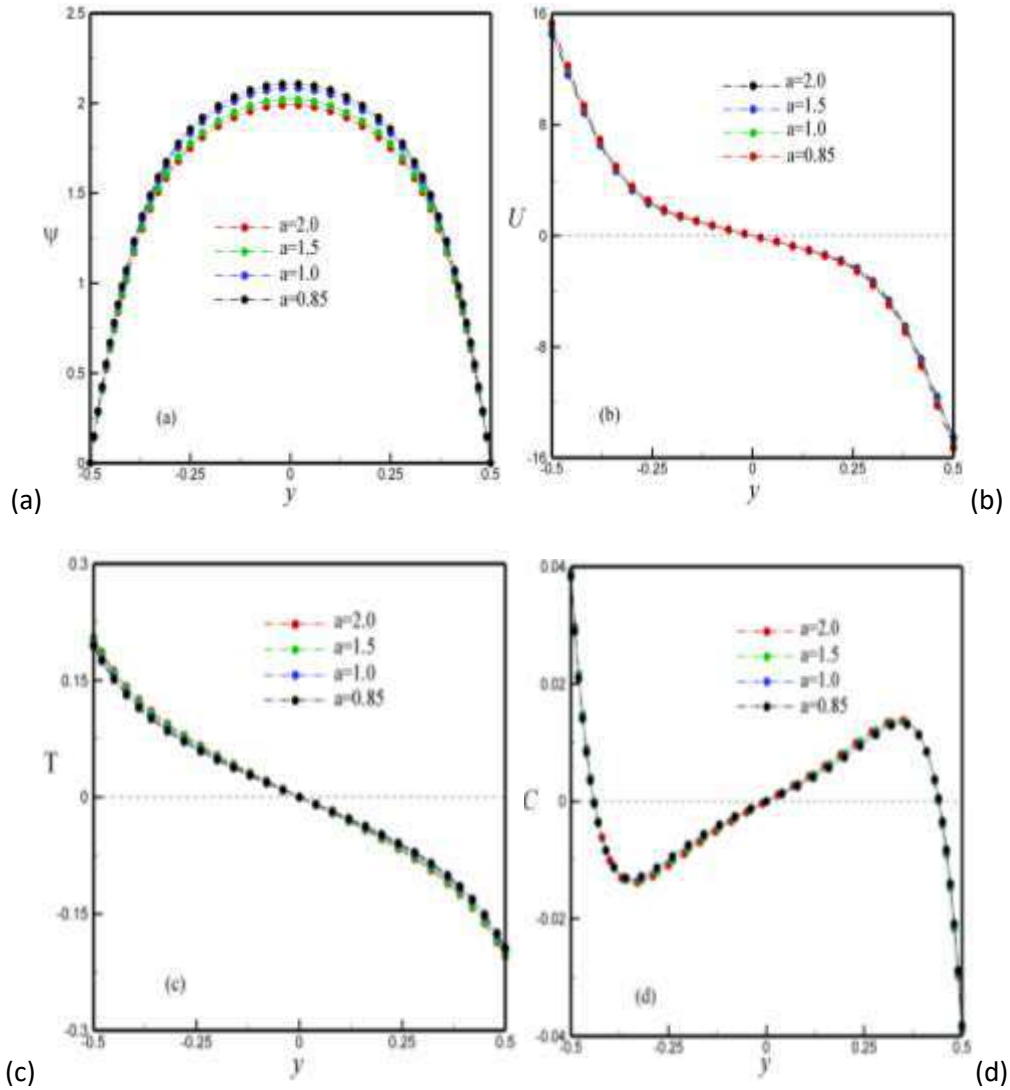


Figure (IV.9.8) : Effet de paramètre a sur le profils , la fonction d'écoulement Ψ (a) , la vitesse U (b) , la température T(c) , la concentration s (d) .

Conclusion :

L'objectif de cette étude est de présenter une étude numérique du transfert de chaleur par convection thermosolutale dans une centre de cavité carrée remplie d'un fluide non-newtonien .l'équation constitutive du fluide fluidifiant est modélisée par l'équation de Carreau – Yassuda . les équations différentielles gouvernantes sont considérablement simplifiées sur la base de la théorie des flux parallèles . les paramètres déterminants du problème sont le nombre de Rayleigh Ra_T , les paramètres du modèle rhéologique de Carreau – Yassuda , à savoir : n, E, s, a . les résultats montrent un fort effet du comportement non – newtonien du fluide sur

les profils de l'écoulement, de vitesse, de température et de concentration à l'intérieur de la cavité . le transfert de chaleur résultant à travers la cavité est considérablement affecté .

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique de transfert de chaleur par convection thermosolutale dans une cavité carrée remplie par un milieu poreux saturé par un fluide non-Newtonien.

Le transfert de chaleur et de masse de la convection thermosolutale avec les effets des paramètres rhéologiques de Carreau-Yasuda dans une cavité carrée remplie d'un fluide non-newtonien de type power-law a été étudié. On a utilisé un modèle de Darcy-Brikman pour établir un modèle mathématique La méthode des différences de volume finies est utilisée pour simuler le problème. Cette étude a été menée pour les paramètres pertinents dans les plages suivantes : indice de power-law, n, $0{,}4 \leq n \leq 1$, rapport de viscosité infini , s, $0 \leq s \leq 1$, paramètres de constante de temps, E, $0 \leq E \leq 100$ et paramètre, a, $0{,}1 \leq a \leq 2$. Le nombre de Prandtl est fixé à Pr =10. L'intensité du flux et la chaleur et de masse sont exprimées par les coefficients de contrôle du problème.

Les résultats obtenus montrent que:

- le régime d'écoulement de convection Dupuit-Darcy est caractérisé par l'existence d'un écoulement parallèle .
- En prenant des valeurs élevées du rapport de conductivité thermique et du coefficient de transfert thermique gradué , le milieu poreux est plus proche de l'hypothèse d'équilibre thermique .

- La diminution de l'indice de puissance, n, favorise l'amplitude finie de la convection sous-critique.
- Le transfert de chaleur et de masse s'améliore lorsque l'indice de loi de puissance, n, diminue.
- La force de la convection est provoquée par la diminution de l'indice de loi de puissance, n.
- Un modèle parallèle est découvert en diminuant la valeur de, s, et en augmentant la valeur de, E.
- Pour une valeur donnée de, $[\![Ra_T]\!]_T$, les taux de transfert de chaleur et de masse augmentent avec les fluides d'amincissement par cisaillement.

- le paramètre, a , n'influence pas sur le taux de transfert de masse et un effet très petite sur le taux de chaleur .

Références bibliographiques

[1] https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104304 page 1.

[2] Natural convection in a rectangulaire enclosure with partial heating of the lower surface : expérimental résults, Internationa*l* Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 36, pp. 4067-4071.

[3] DJEBLI Ahmed ;Convection naturelle bi-diffussive dans une enceinte rectangulaire remplie d'une matière poreuse .Mémoire de Magister (2009) Université des sciences et de la technologie . Houari Boumediene , Alger.

[4] BENNACER R, TOBBAL A , BEJI H and VASSEUR P . Double Diffusive Convection in a Vertical Enclosure FilledwithAnisotropicPorous Media , Int.j.Thermal Sciences , 40,1.30-41.(2001) .

[5] KHAIR K , R .and BEJAN A . Mass Transfert to Natural Convection Boundary Layer Flow Driven by Heat Transfert. J . Heat Transfert . 107,979-981.(1985).

[6] Effects of thermal boundary conditions on natural convection flows within a square cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 4525-4535.

[7] TERVISAN O , V . and BEJAN A . Natural Convection withCombinedHeat and Mass Transfert Buoyancy Effects in a poreuse Medium , Int . j . Heat and Mass Transfert , 28, 1597-1611 .(1985).

[8] POULIKAKOS D . Double Diffusive Convection in a Horizontal Sparsely Packed poreuse Layer , Int. Comm . Heat Mass Transfert , 13 , 587-598.(1986).

[9] Study of buoyancy-induced flows subjected to partially heated sources on the left and bottom walls in a square enclosure, International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 1219-1231.

[10] Density maximum effect on buoyancydriven convection of water in a porous cavity with variable side wall températures, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 1955-1961.

[11] A numerical and experimental analysis on the natural convective heat transfer of a small heating strip located on the floor of a square cavity, Applied Thermal Engineering, vol. 28, pp. 25-35.

[12] Natural convection in a heat generating hydrodynamically and thermally anisotropic non-Darcy porous medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 4691-4703.

[13] TASLIM M , and NARUSSAWA U , Binaryfluid Composition and Double Convection in a poreus Medium . J . Heat Transfert , 108 , 221-224.(1986).

[14] Natural convection and fluid flow in inclined enclosure with a corner heater, Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 340- 350.

[15] Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source, International Journal of Thermal Sciences, vol. 48, pp. 2063-2073.

[16] Heatline analysis of thermal mixing due to natural convection in discretely heated porous cavities filled with various fluids, Chemical Engineering Science, vol. 65, pp. 2132-2152.

[17] Buoyancy induced convection in a porous cavity with partially thermally active sidewalls, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, pp. 5173-5182.

[18] Optimal location of a pair heat source-sink in an enclosed square cavity with natural convection through PSO algorithm, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 38, pp. 652-658.

[19] Natural convection in an enclosure with a localized nonuniform heat source on the bottom wall, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, pp. 2820-2828.

[20] Natural convection in a square cavity containing a sinusoidal cylinder, International Journal of Thermal Sciences, vol. 51, pp. 112-120.

[21] Natural convective flow in an inclined lid-driven enclosure with a heated thin plate in the middle, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 8073-8087.

[22] Unsteady natural convection within a differentially heated enclosure of sinusoidal corrugated side walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 5696-5708.

[23] BOUGURRA Yasser ; Simulation numérique de la convection naturelle thermosolutale avec effet Soret, mémoire de Master Faculté des sciences appliqué Département de mécanique Université Kasdi Merbah Ouargla (2013/2014).

[24] ZEDMIA Khouloud, RABAH Fissa Asma Etude de la convection thermosolutale dans une cavité poreuse saturée par un fluide non newtonien, mémoire de Master Faculté de technologie Université Dr.Yahia Farés de Medea (juin2020).

[25] BRAHIMI Meryem , DEBIH Maroua Etude numérique de la convection naturelle ausein d'une cavité carrée , Mémoire de diplôme de Master Académique Faculté des sciences Université Mohamed Boudiaf – Msila (22/06/2020).

[26] ABDELKRIM Fatima ; Etude de la convection naturelle thermique dans une enceinte fermée , Mémoire de diplôme de Master Académique Faculté des sciences Université Mohamed Boudiaf – Msila (25/06/2018).

[27] MENACER DALILA ; Étude numérique de la convection mixte dans des cavités phénomène de bifurcation , mémoire de diplôme magister en physique Faculté des sciences exactes Université Mentouri – Constantine (2012).

[28] KAHHOUL Abdelouahab ; Etude numérique de la convection thermosolutale dans une cavité parallélépipédique , Mémoire de Master Faculté des Sciences et de la Technologie Université Mohamed Khider de Biskra (10/ 07/ 2019).

[29] MAKHLOUFI Mohamed , AMMAR Amine ; Simulation numérique de la convection naturelle bi- duffisuve dans une cavité poreuse , Mémoire de Master Faculté des sciences et sciences appliquée Université Larbi Ben M'hidi , Oum El Bouaghi (2017/2018).

[30] ATTIS Nedjema , BASSOUR Marwa ; Etude de la convection thermosolutale dans une cavité saturée par un fluide non newtonien , mémoire de Master Faculté de technologie Université Dr.Yahia Farés de Medea(2020/2021).

[311 http://dspace.univ-tlemcen.dz. Chapitre I :généralités sur les écoulements dans les milieux poreux .

[32] BOUZID Noual ; Etude de la convection double Diffusive dans une cavité composite (poreux – fluide), mémoire de Master Faculté de technologie Université Dr.Yahia Farés de Medea (2015/2016).

[33] SAFI Safia ; Etude de la convection bidiffusive dans un milieu poreux anisotrope , Mémoire de diplôme de Docteur en Sciences En génie climatique Faculté des sciences de la technologie Université Constantine I (4 / 7 / 2013) .

[34] BELAHMADI Esma ; Simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée poreuse , Mémoire de diplôme de Magister en Génie Mécanique Faculté des sciences de la technologie Université Constantine I (2013) .

[35] Mr MOUHOUS Ouahab ; Simulation numérique d'un écoulement diphasique eau – huile dans un milieu poreux , Mémoire de diplôme de Master Académique en génie mécanique Faculté de génie de la construction Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou (2015/2016) .

[36] http//www.futura-sciences.com définition de la viscosité thermo physique .

[37] http://fr.m.wikipedia.org régime laminaire .

[38] tier…< doc < http://www.persee.fr régime intermédiaire .

[39] http://fr.m.wikipidia.org régime turbulent .

[40] http://staff.univ-batna2.dz .chapitre 1 Application des fluide non newtonien .

[41] http://fr.m.wikipedia.org définition de fluide non newtonien .

[42] http:// staff.univ-batna2.dz chapitre 3 : Comportement non newtonien .

[43] M.KADJA ; RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATION AUX DERIVEES PARTIELLES : METHODES DES DIFFERENCES FINIES , cours et exercices Résolus première édition . LES EDITIONS DE L'UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE (2000/2001) page (18-24).