

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations énergétiques et turbomachines

Par :

**MAHMOUD Imad**

**ALLAOUA Abdelhak**

**Thème**

---

**Ecoulement d'un fluide dans un espace annulaire rempli d'une couche poreuse**

---

Soutenu le 07/10/2021 devant le jury composé de:

Mme. ADJOUADI. N

Président

Mr. ADNANI. M

Rapporteur

Mr. LAUCHE. N

Examineur

**Année Universitaire 2020-2021**



## **Déclaration sur l'honneur** **Engagement pour respecter les règles d'authenticité** **scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche**

*Arrêté ministériel n° 933 du 28 juillet 2016(\*) fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : .....

Prénom : .....

Matricule : .....

Spécialité et/ou Option : .....

Département : .....

Faculté : .....

Année universitaire : ...../.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : .....

Intitulé : .....

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

(\*) *Lu et approuvé*

.....

## Remerciements

*Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à mon promoteur Monsieur Massinissa ADNANI, pour sa grande disponibilité et pour m'avoir conseillé et dirigé pendant la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce PFE sans oublier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation et l'aide qu'ils m'ont fournie pendant la période de mon cursus.*

*Enfin, toute mon affection à mes parents qui ont toujours répondu présents, Et été sources de soulagement, et sans qui, tout aurait été plus compliqué.*

# Sommaire

<b>Remerciements .....</b>	<b>i</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>ii</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>v</b>
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur les milieux poreux .....</b>	<b>2</b>
I.1. Introduction .....	2
I.2. Définition .....	2
I.3. Classification des milieux poreux .....	2
I.3.1. Matrice consolidée .....	2
I.3.2. Matrice non-consolidée .....	3
I.4. Caractéristique des milieux poreux .....	3
I.4.1. La porosité .....	4
I.4.2. La perméabilité .....	4
I.4.2.1. La perméabilité absolue .....	4
I.4.2.2. La perméabilité effective .....	5
I.4.2.3. La perméabilité relative .....	5
I.4.3. La surface spécifique .....	6
I.4.4. La saturation.....	6
I.4.5. La teneur en eau .....	7
I.5. Equations de base des écoulements en milieu poreux.....	7

I.5.1. Dans le cas d'un écoulement monophasique [11].....	7
I.5.1.1. La loi de Darcy [11] .....	8
I.5.1.2. La loi de conservation de masse .....	9
I.5.1.3. Equation de pression .....	9
I.6. Régime d'écoulement dans les milieux poreux [14] .....	10
<b>Chapitre II : Présentation du problème .....</b>	<b>11</b>
II.1. Introduction .....	11
II.2. Formulation physique .....	11
Hypothèse de modélisation .....	12
II.3. Formulation mathématique.....	12
II.3.1. Equations en milieux poreux .....	12
II.3.2. Hypothèse .....	13
II.3.3. Equation dimensionnelle .....	13
Equation de quantité de mouvement .....	13
Equation d'énergie .....	14
II.3.4. Variable adimensionnelle .....	14
II.3.5. Equation adimensionnelle.....	14
Equation d'énergie .....	15
II.3.6. Conditions aux limites .....	15
II.4. Formulation numérique .....	15
II.4.1. Introduction .....	15
II.4.2. Forme générale des équations.....	16
<b>Chapitre III : Résultats et discussions.....</b>	<b>17</b>
III. 1. Introduction .....	17
III.2. Effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen.....	18
III.3. Validation des résultats .....	19
III.4. Effet du nombre de darcy (Da) et du nombre de Grashof (Gr) .....	20
III.4.1. Les lignes de courant et les isothermes .....	21
III.4.2. Discussions.....	22
III.4.3. Profil de vitesses.....	22
III.4.4. Discussions.....	24
Conclusion.....	24
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>25</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>27</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>29</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>30</b>

## Liste des figures

Figure I.1 : Représentation schématique du volume élémentaire représentatif [5].....	4
Figure I.2 : Dispositif de Darcy [12] .....	8
Figure II.1 : Géométrie du problème.....	11
Figure II.2 : Géométrie du problème dans les coordonnées cartésiennes .....	12
Figure III.1 : Sensibilité du maillage au Nusselt moyen .....	19
Figure III.2 : Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la référence [18] .....	20
Figure III.3 : Lignes de courant pour différents nombres de Darcy ( $Gr= 10^4$ ) .....	21
Figure III.4 : Lignes isothermes pour différents nombres de Darcy ( $Gr= 10^4$ ).....	21
Figure III.5 : Lignes de courant pour différents nombres de Darcy ( $Gr= 10^5$ ) .....	21
Figure III.6: Lignes isothermes pour différents nombres de Darcy ( $Gr= 10^5$ ).....	22
Figure III.7: Profil de vitesse axiale adimensionnelles pour différent nombre de Darcy ( $Gr=10^4$ ) .....	23
Figure III.8: Profil de vitesse axiale adimensionnelles pour différent nombre de Darcy ( $Gr=10^5$ ) .....	23

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Valeurs de perméabilité de certains matériaux (Sheidegger 1974) [7].....	6
Tableau II.1 : Equations générales de conservation (milieu poreux).....	16
Tableau III.1 : Effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen .....	18

# NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
A	: La surface	m <sup>2</sup>
CF	: Coefficient de FORCHHEIMER	-
Cp	: Coefficient de chaleur spécifique à pression constante	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Da	: Nombre de Darcy	-
g	: Accélération de la pesanteur	m s <sup>-2</sup>
Gr	: Nombre de Grashof	-
K	: La perméabilité	m <sup>2</sup>
Nu	: Nombre de Nusselt	-
p	: Pression	Pa
P	: Pression adimensionnelle	-
Pr	: Nombre de Prandtl	-
Q	: Débit de fluide	kg s <sup>-1</sup>
Re	: Nombre de Rrynolds	-
S	: La saturation	-
T	: Température dimensionnelle	K
ur, uz	: Composantes de la vitesse dimensionnelle	m s <sup>-1</sup>
UR, UZ	: Composantes de la vitesse adimensionnelle	-
r, z	: Coordonnées cylindrique dimensionnelle	-
V	: Volume	m <sup>3</sup>
R, Z	: Coordonnées cylindrique adimensionnelle	-

## Symboles grecs

$\varepsilon$	: La porosité	-
$\beta_T$	: Coefficient d'expansion thermique	k <sup>-1</sup>
$\lambda$	: La conductivité thermique	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\mu$	: La viscosité dynamique	Pa s
$\theta$	: Température adimensionnelle	-

---

$\Gamma$	: Coefficient de diffusion	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\rho$	: Masse volumique	$\text{kg m}^{-3}$

### Indices

a	: Absolue
<i>f</i>	: Fluide
m	: Valeur moyenne
max	: Valeur maximale
min	: Valeur minimale
<i>inf</i>	: Inférieur
i	: Incrément
L	: Libre
P	: Poreux
<i>eff</i>	: Effective
r	: Relative
<i>ref</i>	: Référence
S	: Solide
<i>spé</i>	: Spécifique
T	: Thermique
*	: Valeur adimensionnelle

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Du fait de son vaste champ d'application dans l'industrie, notamment dans la mécanique du solide et la mécanique des fluides, l'étude des milieux poreux constitue un domaine important aujourd'hui. Afin d'aboutir à des résultats fiables aux phénomènes aillant rapport avec ces milieux, l'utilisation de modèles continus est parmi les démarche recommandée aux ingénieurs.

Malgré la mise en œuvre des moyens d'étude des écoulements en milieux poreux, des contraintes persistent en ce qui concerne les connaissances fondamentales dans ce domaine.

Cependant, l'étude de l'écoulement en présence de milieu poreux fait l'objet d'un intérêt accru, Cet intérêt on le réside dans le fait que leur présence permet la modification des écoulements et des transferts thermiques.

L'objectif du présent travail est d'étudier un l'écoulement d'un fluide dans un espace annulaire rempli d'une couche poreuse pour se faire on présente dans le premier chapitre, quelques définition et les notions fondamentale relative à l'écoulement dans les milieux poreux d'une manière générale.

**Chapitre I**

**Généralité sur les milieux**

**poreux**

# Chapitre I : Généralité sur les milieux poreux

## I.1. Introduction

L'étude des écoulements dans un milieu poreux repose sur la connaissance des propriétés du milieu comme la porosité, la perméabilité...etc. Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter d'une manière générale quelques notions fondamentales sur les milieux poreux et les caractéristiques qui diffèrent un milieu poreux d'un autre. Afin de d'élaborer d'une manière spécifique les équations de base des écoulements dans un milieu poreux.

## I.2. Définition

Un milieu poreux est défini comme étant un solide dit matrice d'une certaine forme contenant des vides appelés pores. Ces vides peuvent être reliés ou non les uns aux autres, soudés (consolidés) ou non et leurs distributions dans un milieu poreux est variable et désordonnées. Une ou plusieurs phases fluides s'écoulent à l'intérieur et peuvent échanger, avec la matrice solide, de la matière et /ou de l'énergie.

Il existe une variété d'exemples de matériaux poreux rencontrés dans la nature ou dans l'industrie, il peut s'agir d'empilement de billes, de panneaux de fibres, de béton, du bois, de roches ou bien de structures géologiques comme les bassins sédimentaires, les gisements de pétrole ou les couches aquifères. [1]

## I.3. Classification des milieux poreux

Les milieux poreux sont de très vaste variété et de nature. Leur classification se fait selon : [2]

### I.3.1. Matrice consolidée

Ce type de milieux poreux se présente sous la forme d'un bloc compacte parsemé de petit pores, tels que les roches, le ciment, le bois...etc.

### I.3.2. Matrice non-consolidée

Dans ce cas, la matrice n'est formée que de grains ou particules non soudées entre elles (graviers, sable, etc.)

## I.4. Caractéristique des milieux poreux

Les propriétés du milieu poreux dépendent de l'échelle de description considérée. Elles ont un sens physique à une échelle macroscopique et leurs valeurs varient avec le volume de mesure qui peut être, par exemple, de la taille d'une hétérogénéité locale, d'une strate ou d'un aquifère.

Que ce soit dans le cadre de la modélisation numérique ou celui de la mesure des paramètres, il est nécessaire de pouvoir changer d'échelle et déduire la valeur des paramètres d'une échelle à l'autre. C'est dans ce but que le calcul de paramètres équivalents a fait l'objet de plusieurs études théoriques. [3]

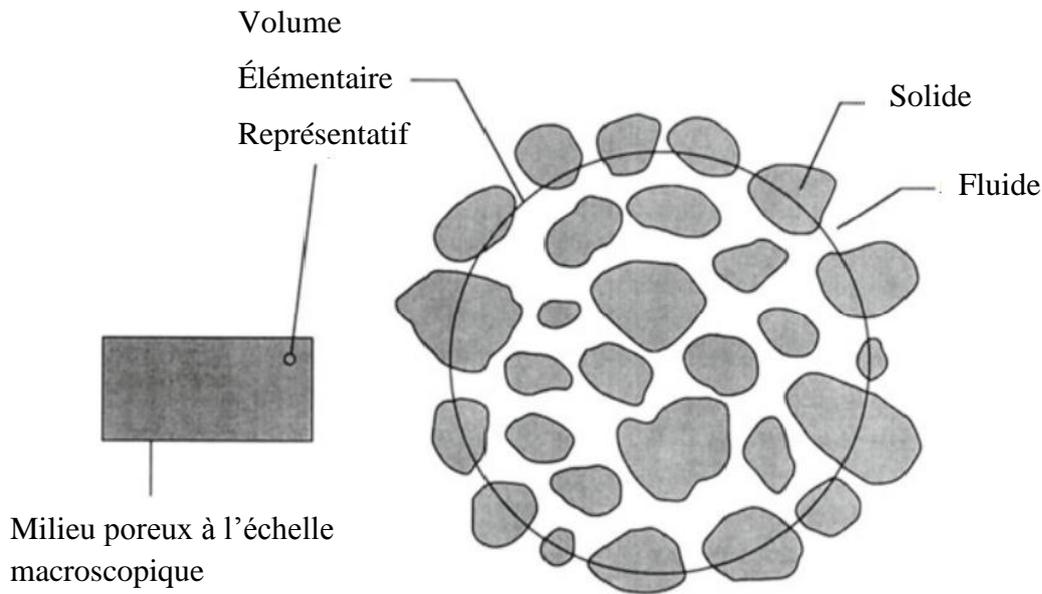
Mais avant de décrire ces propriétés, il est nécessaire d'introduire la notion de V.E.R.

### ➤ Volume élémentaire représentatif

Les équations applicables dans le cas des grandeurs macroscopiques ne sont pas nécessairement similaires à celles qu'on peut appliquer au niveau microscopique. Nous introduisons donc la notion volume élémentaire représentatif (VER) pour établir de telles équations, cette notion permet au milieu poreux d'être considéré comme un milieu continu (Bear 1979). Le système continu dans cette théorie est mis en avant par rapport au système physique réel discret.

L'intérêt majeur de cette notion réside dans la formulation des changements dans le système des équations différentielles qui décrivent les processus qui ont lieu.

En général, afin de contenir un nombre de pores et permette la définition d'une propriété moyenne globale avec une fluctuation d'un pore à un autres négligées, mais suffisamment petite afin de répondre à la condition qui fait que les variations du paramètre d'un domaine à un autre voisin puissent être approchées par des fonctions continues (Marsily, 1981). [4]



**Figure I.1** : Représentation schématique du volume élémentaire représentatif [5]

#### I.4.1. La porosité

Le volume total  $V_T$  d'un matériau poreux est constitué de la somme du volume des solides  $V_S$  et du volume des pores (ou vides)  $V_V$  présents dans le volume total du matériau :

$$V_T = V_V + V_S \quad (I.1)$$

Lorsque le volume total considéré est unitaire, la somme ci-dessus est égale à l'unité. La Porosité  $\varepsilon$  est définie comme étant le rapport du volume des pores  $V_V$  d'un milieu poreux sur son volume total  $V_T$  :

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} \quad (I.2)$$

$\varepsilon$  varie donc entre 0 (solide pleins) et 1 (volume complètement vide).

La porosité n'a pas d'unité et elle est souvent exprimée en pourcentage.

#### I.4.2. La perméabilité

##### I.4.2.1. La perméabilité absolue

La perméabilité absolue peut être définie comme étant l'aptitude du milieu poreux à laisser circuler le fluide à travers ses pores.

La perméabilité est un paramètre complexe à déterminer, et elle est généralement évaluée expérimentalement.

#### I.4.2.2. La perméabilité effective

Elle est définie comme étant l'aptitude du milieu poreux à laisser circuler un fluide à travers ses pores en présence d'un ou plusieurs autres fluides.

Exemple : Pour deux fluides **a** et **b**

$$Q_s = -A \frac{k_{effa}}{\mu_a} \frac{dp}{dx} \quad (I.3)$$

$$Q_s = -A \frac{k_{effb}}{\mu_b} \frac{dp}{dx} \quad (I.4)$$

**A** : Section du milieu poreux [m<sup>2</sup>]

**Q** : Débit de fluide [kg/s]

**K<sub>effa</sub>** et **K<sub>effb</sub>** : perméabilité effective des fluides a et b

On introduit aussi la notion de perméabilité relative, qui correspond au rapport de la perméabilité effective et à la perméabilité absolue :

$$k_r = \frac{k_{eff}}{k_a} \quad (I.5)$$

#### I.4.2.3. La perméabilité relative

La notion de perméabilité relative correspond au rapport de la perméabilité effective à la perméabilité absolue. Elle décrit le point auquel un fluide est gêné :

$$k_r = \frac{k_{eff}}{k} \quad (I.6)$$

Le Tableau ci-dessous donne les valeurs de la perméabilité pour quelques matériaux [7]

Matériaux	Perméabilité [m <sup>2</sup> ]
Ardoise noir en poudre	4.9*10 <sup>-14</sup> – 1.2*10 <sup>-33</sup>
Brique	4.8*10 <sup>-15</sup> - 2.2*10 <sup>-13</sup>
Béton bitumineux	10 <sup>-13</sup> - 2.2*10 <sup>-11</sup>
Cuivre (en poudre)	3.3*10 <sup>-10</sup> - 1.5*10 <sup>-9</sup>
Cuir	9.5*10 <sup>-14</sup> - 1.2*10 <sup>-13</sup>
Calcaire (dolomite)	2*10 <sup>-15</sup> - 4.5*10 <sup>-14</sup>
Sable	2*10 <sup>-11</sup> - 1.8*10 <sup>-11</sup>
Poudre en silice	1.3*10 <sup>-14</sup> - 5.1*10 <sup>-14</sup>
Sable	2.9*10 <sup>-13</sup> - 1.4*10 <sup>-11</sup>
Cigarette	1.1*10 <sup>-9</sup>
Terre	2.9*10 <sup>-13</sup> - 1.4*10 <sup>-11</sup>

**Tableau I.1** : Valeurs de perméabilité de certains matériaux (Sheidegger 1974) [7]

#### I.4.3. La surface spécifique

Elle permet d'évaluer la surface de contact qu'offre un réseau poreux à un fluide qui circule au travers. Elle se définit comme le rapport de l'aire de la surface totale des interfaces solide-pores, - au volume de l'échantillon V :

$$A_{\text{spé}} = \frac{A_{\text{sf}}}{V} \quad (1.7)$$

$A_{\text{spé}}$  : La surface spécifique. [m<sup>2</sup>]

#### I.4.4. La saturation

En général, l'espace poreux peut contenir une phase gazeuse, une phase ou plusieurs phases liquides et une phase ou plusieurs phases solides. La saturation  $S_i$  d'une phase  $i$  est définie par la proportion du volume de pores occupé par cette phase:

$$S_i = \frac{V_i}{V_p} \quad (1.8)$$

Avec  $V_i$  et  $V_p$  le volume de la phase fluide  $i$  et le volume de pores. La somme des saturations est égale à 1 pour un milieu saturé (en écoulement diphasique). La saturation en eau en fin de déplacement obtenue lors du drainage d'un milieu poreux, est dite irréductible et on la note  $S_{wi}$ . La saturation finale en huile est dite résiduelle dans le cas d'une imbibition sur un milieu mouillable à l'eau.

#### I.4.5. La teneur en eau

La teneur en eau est le rapport du volume de l'eau  $V_{eau}$  contenue dans les pores (ou vides) du milieu, au volume total  $V_t$  du milieu considéré :

$$0 < \theta = \frac{V_{eau}}{V_t} < 1 \quad (\text{I. 1})$$

Par les relations (1.2) et (1.8), la saturation peut s'exprimer comme étant le rapport de la teneur en eau à la valeur de la porosité totale. [10]

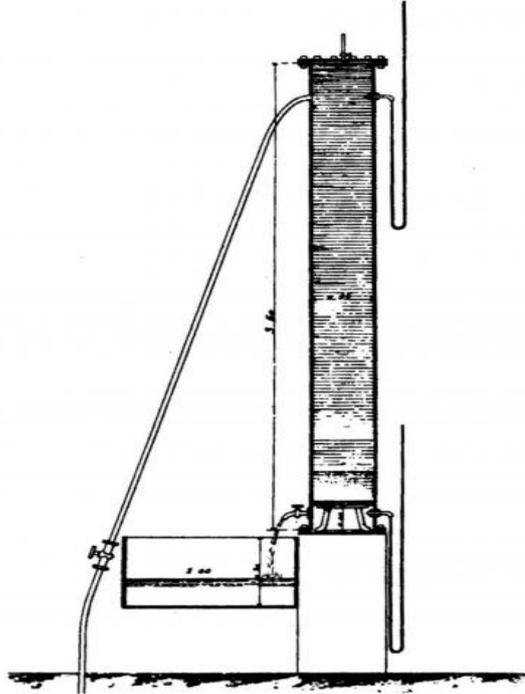
$$S = \frac{\theta}{\varepsilon_t} \quad (\text{I.10})$$

### I.5. Equations de base des écoulements en milieu poreux

Deux principales équations régissent la dynamique des fluides dans les milieux poreux, ces équations sont la loi expérimentale de Darcy et l'équation de continuité :

#### I.5.1. Dans le cas d'un écoulement monophasique [11]

En 1855, une série de 35 expériences ont été réalisées à Dijon par Henry Darcy, au cours de ces expériences avec un débit fixe entre 2.13-29.4 L/min, il fit couler de l'eau à travers une colonne de 2.5m de hauteur et 0.35m de diamètre, cette colonne et remplie de grains de sable de Saône (Darcy, 1856). Il en découle après ça la loi (I.11) qui porte son nom aujourd'hui



**Figure I.2 :** Dispositif de Darcy [12]

#### I.5.1.1. La loi de Darcy [11]

L'écoulement de l'eau souterraine se fait d'un niveau d'énergie le plus élevé vers un autre plus faible. Cette énergie est le résultat de l'altitude et de la pression.

Dans les milieux poreux, en régime permanent ou transitoire la loi de Darcy exprime la vitesse de filtration en fonction du gradient de pression et de la gravité. La loi de Darcy pour un fluide incompressible est donnée sous la forme générale (Bear). [11]

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu}(\overrightarrow{\text{grad } p} - \rho\vec{g}) \quad (\text{I.11})$$

$\vec{u}$  : Le vecteur vitesse de Darcy [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\mu$  : La viscosité dynamique de fluide, [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$k$  : La perméabilité intrinsèque du milieu [ $\text{m}^2$ ]

$p$  : La pression [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

$\rho$  : La masse volumique du fluide [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

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

### I.5.1.2. La loi de conservation de masse

Le principe de conservation de la masse d'un fluide en mouvement est exprimé à partir de l'équation de continuité. La masse du fluide prélevée ou injectée dans un volume élémentaire vaut à la somme de la variation de la masse du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des flux massiques traversant la surface du volume. [13]

$$\emptyset \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{I.12})$$

### I.5.1.3. Equation de pression

En négligeant la variation spatiale de la masse volumique la loi de darcy (I.11) couplée avec l'équation de continuité (I.12) donne l'équation de pression :

$$\mathbf{div}\left(-\left(\rho \frac{k}{\mu} (\overrightarrow{\text{grad}p} - \rho \vec{g})\right)\right) + \emptyset \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{I.13})$$

Avec :

Le coefficient de perméabilité  $K$  est un coefficient scalaire si le milieu poreux est isotrope

Ou bien si l'écoulement est unidirectionnel.

Quand le milieu dans l'espace à trois dimensions est anisotrope, le coefficient de conductivité hydraulique est défini par un tenseur symétrique de la forme :

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

En se plaçant dans le repère de coordonnées dont les axes sont les directions pour lesquelles l'écoulement est effectivement parallèle au gradient de charge, le tenseur de conductivité hydraulique se réduit à ses composantes diagonales.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{I.15})$$

En pratique, deux perméabilités sont distinguées : une perméabilité verticale et une perméabilité horizontale  $K_{xx} = K_{yy}$  (de Marsily). [12]

## I.6. Régime d'écoulement dans les milieux poreux [14]

Il est possible de classer les écoulements en milieu poreux selon trois régimes, en fonction de leur nombre de Reynolds, et ça en représentant le rapport des effets d'inerties et visqueux.

Le nombre de Reynolds s'écrit :

$$\mathbf{R_e} = \frac{\mathbf{q_m d \rho_w}}{\mu} \quad (\text{I.16})$$

$\mathbf{q_m}$  : Vitesse moyenne fictive de darcy. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$\mathbf{\rho_w}$  : Densité du fluide. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

# **Chapitre II**

## **Présentation du problème**

# Chapitre II : Présentation du problème

## II.1. Introduction

Les milieux poreux sont largement utilisés dans l'industrie, on les retrouve dans diverses applications tels que pour le refroidissement des composants électroniques, descelllement des eaux de mer, son utilisation est plus répandu aujourd'hui en raison de sa génération importante des transferts thermique.

Dans cette partie, nous présenterons les équations mathématiques basées sur la formulation aux dérivées partielles, décrivant l'écoulement et le transfert de chaleur par convection dans un canal fluide et d'un autre canal poreux, de géométrie bidimensionnelle.

La formulation mathématique, sous sa forme dimensionnelle et adimensionnelle, est basée sur l'équation de continuité, les équations de mouvement qui sont décrites par les équations de Navier et Stocks dans le cas d'un canal fluide et le modèle de Darcy-Brinkman dans le cas d'un canal poreux et l'équation de l'énergie.

## II.2. Formulation physique

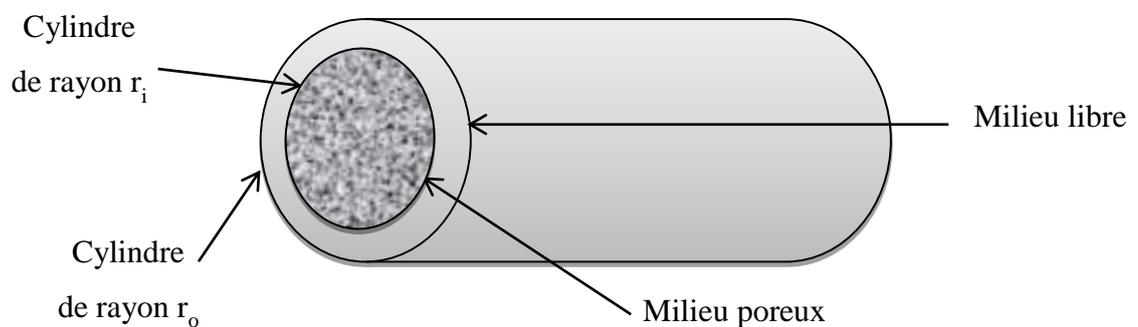


Figure III.1 : Géométrie du problème

## Hypothèse de modélisation

La formulation physique est celle d'un espace annulaire rempli d'une couche poreuse d'un rayon intérieur  $r_i$  et de rayon extérieur  $r_o$ .

Une distribution aléatoire de particules sphérique constitue le milieu poreux qui est délimité par deux cylindres coaxiaux isothermes de rayon intérieur et extérieur  $r_i$  et  $r_o$  respectivement.

Entre ces deux cylindres s'écoule un fluide saturant le milieu poreux, supposé incompressible en régime stationnaire et dynamiquement établi.

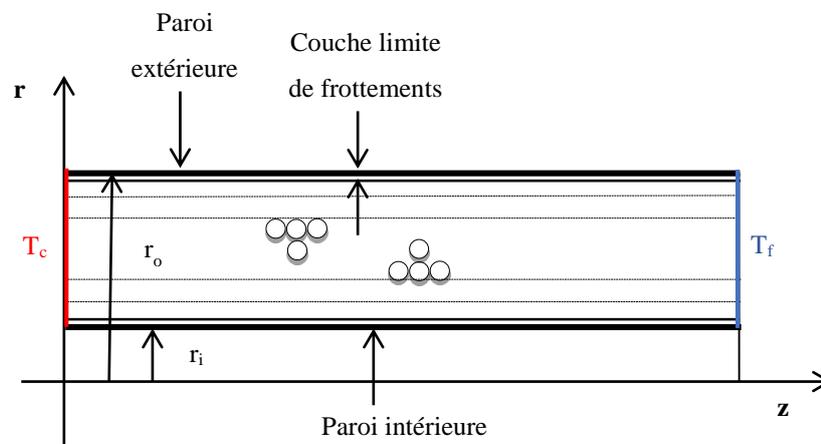


Figure II.2 : Géométrie du problème dans les coordonnées cartésiennes

## II.3. Formulation mathématique

### II.3.1. Equations en milieux poreux

Pour un fluide incompressible l'équation de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans le cas radial s'écrivent ainsi :

Equation de continuité :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Equation de conservation de la quantité de mouvement :

Selon  $r$  :

$$\rho \left( u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu f \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right] + \rho \vec{g} \quad (\text{II.2})$$

Selon z :

$$\rho \left( \mathbf{u}_r \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial r} + \mathbf{u}_z \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu f \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{u}_z}{\partial z^2} \right] \quad (\text{II. 3})$$

### II.3.2. Hypothèse

Afin de simplifier la formulation du modèle mathématique, plusieurs approximations ont été adoptées. Les hypothèses que nous avons retenues sont les suivantes :

- Fluide newtonien et incompressible.
- Le régime d'écoulement laminaire et permanent.
- Le milieu poreux remplissant le canal est homogène, isotrope et ne subit de variation de la porosité le long du canal.

### II.3.3. Equation dimensionnelle

Pour ce cas, on considère un modèle continu d'un milieu poreux en se basant sur le concept du volume élémentaire représentatif. Le modèle complet : Darcy, Brinkman, Forchheimer est utilisé afin de bien décrire le bilan de quantité de mouvement.

#### Equation de quantité de mouvement

Pour un écoulement bidimensionnel dans le cas d'un cylindre on a :

Selon r :

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left[ \mathbf{u}_r \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial r} + \mathbf{u}_z \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu_{eff} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{u}_r}{\partial z^2} - \frac{\mathbf{u}_r}{r^2} \right] - \frac{\mu_f \mathbf{u}_r}{K} - \frac{C_{FF} \rho_f}{\sqrt{K}} \mathbf{u}_r |\vec{V}| - \rho g \beta_T (T - T_{ref}) \quad (\text{II.4})$$

Selon z :

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left[ \mathbf{u}_r \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial r} + \mathbf{u}_z \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_{eff} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{u}_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{u}_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\mu_f \mathbf{u}_z}{K} - \frac{C_{FF} \rho_f}{\sqrt{K}} \mathbf{u}_z |\vec{V}| \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$\mathbf{u}_z$  : La vitesse axiale [m.s<sup>-1</sup>]

**Equation d'énergie**

$$(\rho c_p)_f \left( u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_f \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II. 6})$$

**II.3.4. Variable adimensionnelle**

Les équations de conservation de la quantité de mouvement précédemment définies sont adimensionnées en introduisant les variables réduites suivantes :

$$R = \frac{r}{R_x}, \quad Z = \frac{z}{R_x}, \quad U_R = \frac{u_r}{U_0}, \quad U_Z = \frac{u_z}{U_0}, \quad \theta = \frac{T - T_{ref}}{U_0}$$

On a :

$$\mu^* = \frac{\mu_{eff}}{\mu_f}$$

Le rapport de la viscosité dynamique effective du milieu poreux a la viscosité dynamique du fluide.

$$\Delta T = T_s - T_0,$$

On prend  $T_{ref} = T_0$

$$\lambda^* = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f}$$

( $\lambda^*$ ) C'est le rapport de conductivité thermique du milieu poreux a la conductivité thermique du fluide est donné.

**II.3.5. Equation adimensionnelle**

Selon R :

$$\left[ U_R \frac{\partial U_R}{\partial R} + U_Z \frac{\partial U_R}{\partial Z} \right] = -\varepsilon^2 \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\varepsilon^2}{R_e} \mu^* \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial U_R}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 U_R}{\partial Z^2} \right] - \frac{\varepsilon^2}{R_e D_a} U_R - \frac{C_F \varepsilon^2}{\sqrt{D_a}} u_R |\vec{V}| - \frac{\varepsilon^2 G_r}{R_e} \theta \quad (\text{II. 7})$$

Selon Z :

$$\left[ U_R \frac{\partial U_Z}{\partial R} + U_Z \frac{\partial U_Z}{\partial Z} \right] = -\varepsilon^2 \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\varepsilon^2}{R_e} \mu^* \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial U_Z}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 U_Z}{\partial Z^2} \right] - \frac{\varepsilon^2}{R_e D_a} U_Z - \frac{C_F \varepsilon^2}{\sqrt{D_a}} u_z |\vec{V}| \quad (\text{II.8})$$

Trois nombre adimensionnel apparaissent dans cette équation :

$$\mathbf{Re} : \text{nombre de Reynold}; R_e = \frac{\rho_f U_o R_x}{\mu^*}$$

$$\mathbf{Da} : \text{nombre de Darcy}; D_a = \frac{K}{R_x}$$

$$\mathbf{Gr} : \text{nombre de Grashof}; G_r = \frac{g \Delta T \beta_T \rho_f^2 R_x^3}{\mu_f^2}$$

$$\mathbf{Pr} : \text{nombre de Prandtl}; P_r = \frac{\mu_f C_p}{\lambda_f}$$

**Equation d'énergie**

$$\left( U_R \frac{\partial \theta}{\partial R} + U_Z \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) = \frac{1}{Re Pr} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \quad (\text{II. 9})$$

### II.3.6. Conditions aux limites

Les conditions aux limites dynamiques associées au système principal sont les suivantes :

A l'entrée :	$z = 0, \forall r$	$u = u_m$
Sur le cylindre intérieur $r_i$ :	$\forall z, r = r_i$	$u = 0$
Sur le cylindre extérieur $r_0$ :	$\forall z, r = r_0$	$u = 0$

Les conditions thermiques :

A l'entrée :	$z=0, \forall r$	$T = T_c = 300$
A la sortie :	$z = 1, \forall r$	$T = T_f = 270$

## II.4. Formulation numérique

### II.4.1. Introduction

La méthode des volumes finis est une classe de discrétisation des arrangements fortement couronnés de succès en rapprochant la solution d'une grande variété de systèmes des lois de conservation. Elle est employée dans la mécanique des fluides, l'électromagnétisme et beaucoup d'autres secteurs de technologie régis par les systèmes conservateurs qui peuvent être écrits sous la forme intégrale d'un volume de contrôle.

En vue de la géométrie du problème, on choisit la méthode des volumes finis. Cette méthode est plus répondeuse pour résoudre les problèmes d'écoulement de fluides et de transfert de chaleur, on la trouve décrites d'une manière plus détaillée dans le livre de S.V Patankar [15].

Le principe de fonctionnement de cette méthode est de fractionner en nombre de volume fini le domaine physique afin d'intégrer dans chaque domaine physique les équations de conservation.

### II.4.2. Forme générale des équations

Les équations différentielles aux dérivées partielles adimensionnelles présentées dans ce chapitre (II.7 à II.8), peuvent se mettre sous la forme générale d'une équation de transport de type convection diffusion dont les expressions des grandeurs physiques, correspondant à chacune des équations présentées, sont données dans le tableau (II.1)

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{U}\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{V}\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + S_c + S_p \quad (\text{II. 10})$$

$\phi$  : La variable qui peut correspond aux vitesses longitudinale et transversale et à la température.

$\Gamma$  : est le coefficient de diffusion qui représente les propriétés thermo physiques du fluide qui s'exprime en fonction des paramètres adimensionnels.

$S_c$  : représente le terme source qui diffère d'une équation à une autre

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de ces paramètres

Equation de conservation	$\phi$	$\Gamma$	$S = S_p \phi_p + S_c$	
			$S_p$	$S_c$
Equation de continuité	1	0	0	0
Equation du mouvement suivant R	$U_R$	$\frac{\varepsilon^2}{Re} \mu^*$	$\left(\frac{\varepsilon^2}{Re Da} - \frac{C_F \varepsilon^2}{\sqrt{Da}}  \vec{V} \right) - \frac{\varepsilon^2}{Re} \mu^*$	$-\varepsilon^2 \frac{\partial P}{\partial R}$
Equation du mouvement suivant Z	$U_Z$	$\frac{\varepsilon^2}{Re} \mu^*$	$\left(\frac{\varepsilon^2}{Re Da} - \frac{C_F \varepsilon^2}{\sqrt{Da}}  \vec{V} \right)$	$\varepsilon^2 \left(-\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{Gr_T}{Re^2} \theta\right)$
Equation d'énergie	$\theta$	$\frac{\lambda^*}{Re Pr}$	0	0

**Tableau II.1** : Equations générales de conservation (milieu poreux)

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussions**

# Chapitre III : Résultats et discussions

## III. 1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des simulations d'un écoulement fluide dans un espace annulaire. L'espace annulaire est formé par un cylindre plein de rayon  $r_i$  rempli d'une couche poreuse et d'un cylindre avec un rayon  $r_0$  plus grand.

Notre travail consiste à étudier l'influence de la variation du nombre de Darcy sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans le milieu poreux.

Les nombres sans dimensions qui apparaissent dans l'équation de conservation après la mise sous forme adimensionnelle sont :

Le nombre de Darcy (Da)

Le nombre de Grashof (Gr)

Le nombre de Prandlt (Pr)

Le nombre de Reynolds

Le rapport de la viscosité dynamique  $\mu^*$

Le rapport de la conductivité thermique  $\lambda^*$

En prenant les paramètres ci-dessous :

Nombre de Prandlt,  $Pr=0.71$

Un coefficient d'expansion thermique,  $\beta_T = 0.003508 \text{ K}^{-1}$

Nombre de Reynolds,  $Re=50$

Et les variables suivantes :

$$10^{-3} \leq Da \leq 10^3, \quad 10^4 \leq Gr \leq 10^5$$

Les résultats de la simulation sont présentés par la visualisation des contours de fonction des isothermes et de courant ainsi des profils de vitesses.

### III.2. Effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen

Dans ce qui suit, nous avons étudié l'influence du maillage sur la solution numérique et ça pour un nombre de Prandtl  $Pr=0.71$  et un nombre de Reynolds de 50, et un nombre de darcy égale  $10^{-3}$  avec un nombre de Grashoff égale à  $10^{-4}$ . Nous avons obtenu les valeurs de Nusselt moyen pour différent du maillage.

Ces valeurs sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Numéro du maillage	Maillage	Nusselt moyen
1	80x80	5.3104875
2	100x100	5.2841889
3	120x120	5.2833621
4	140x140	5.282003
6	160x160	5.279474
7	180x180	5.279971
8	200x200	5.279924

**Tableau II.1** : Effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen

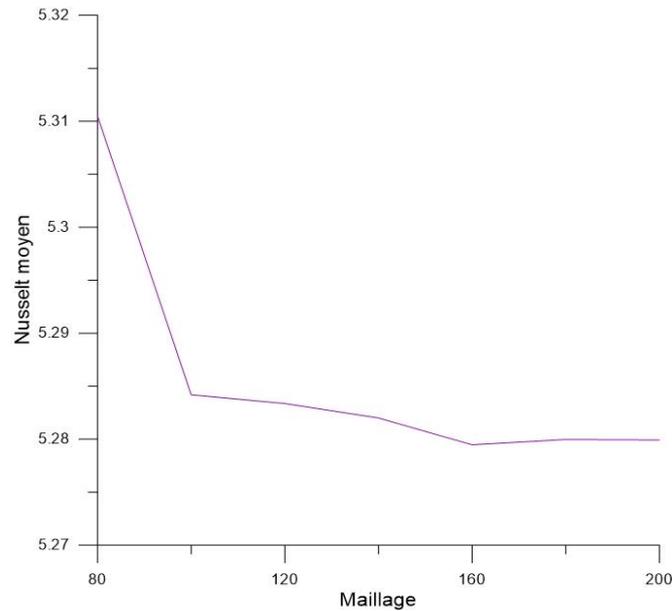
La formule du Nusselt moyen s'écrit come suite :

$$Nu_{moy} = h_r \frac{L}{\lambda}$$

Ou : L est la longueur caractéristique

Comme  $h_r = \frac{q_r}{T_{inf}-T_0}$  et  $q_r = \lambda_f \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=H}$

Avec  $q_r$  la densité du flux de chaleur et  $h_r$  le coefficient d'échange thermique superficiel.



**Figure III.1** : Sensibilité du maillage au Nusselt moyen

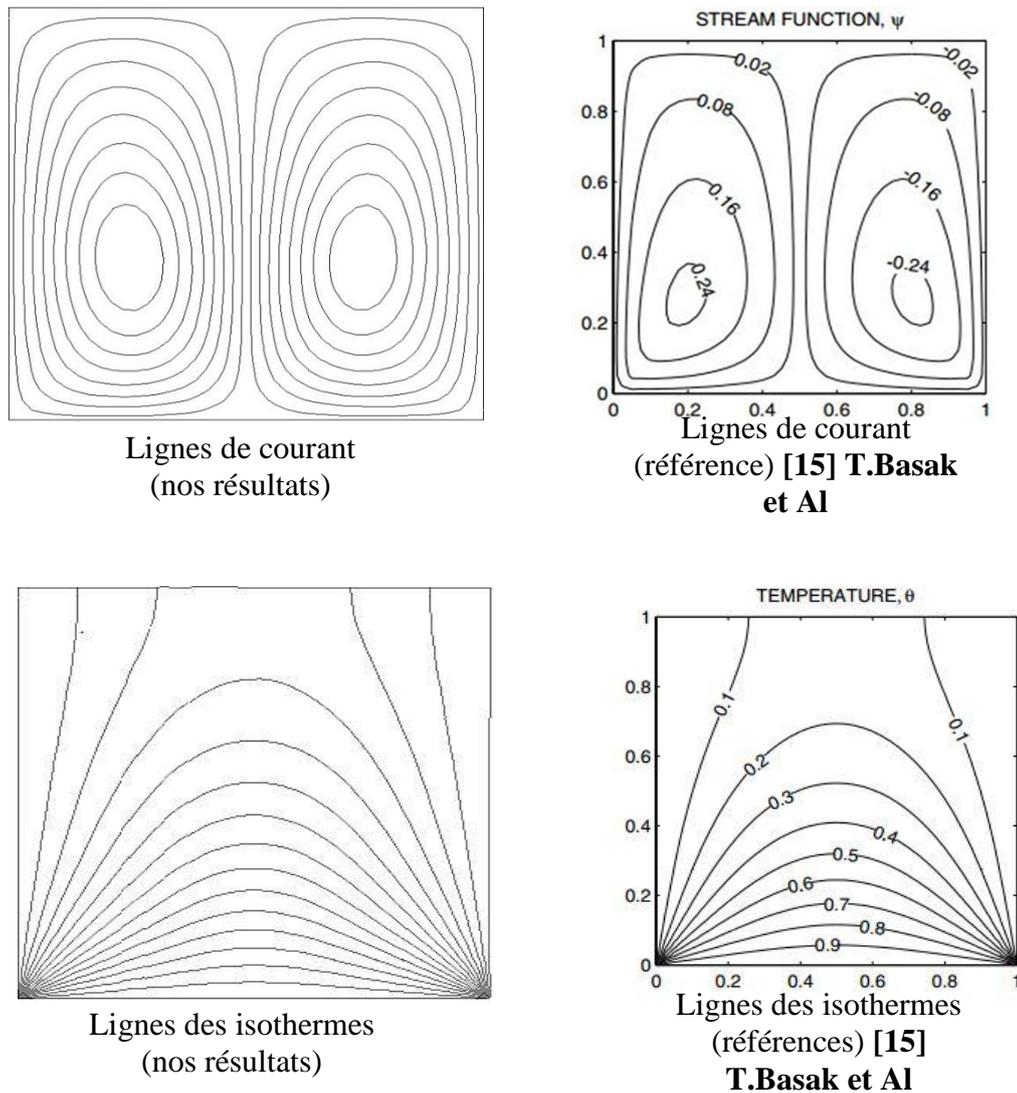
Le choix du nombre de maillage a été fait pour un nombre de 160x160, vu que les résultats obtenus sont très proches à partir de cette valeur.

### III.3. Validation des résultats

Afin de valider le code de calcul et pour donner plus de crédibilité à nos résultats numériques, nous avons pris des cas qui ont déjà été étudiés numériquement et analytiquement et ça pour des cas limites simplifiés.

La première validation de notre simulation numérique est basée sur la convection naturelle dans une cavité carrée remplie d'un milieu poreux par **Tanmay basak, S.Roy , T. Paul , I. Pop [15]**. Nous avons ensuite comparé les contours de champs dynamique et ceux de thermique de notre simulation avec celles fixés à un nombre de Prandlt 0.71.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous :



**Figure III.2 :** Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la référence [18]

Pour un nombre de Reynolds de  $Re=50$  et un nombre de Darcy  $Da=10^{-5}$ , On a effectué une comparaison entre les deux résultats. D'après les figures on constate une coïncidence entre les lignes de courant et celles des isothermes la référence et celles obtenus par notre simulation numérique.

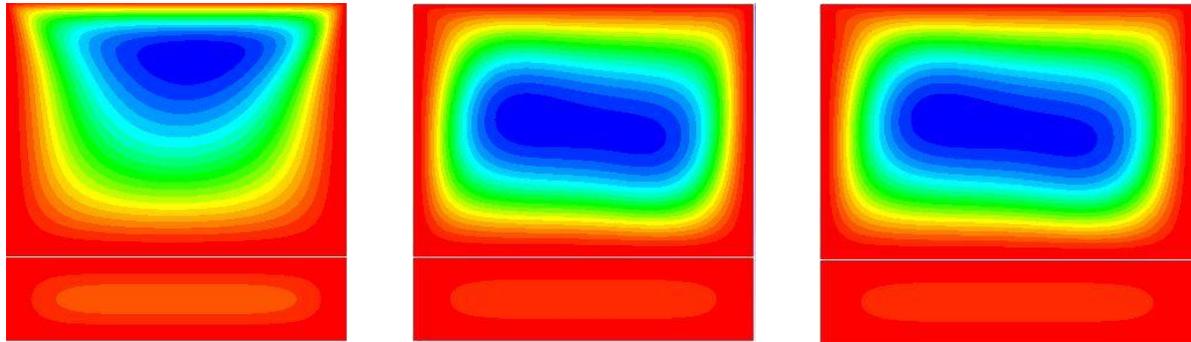
#### III.4. Effet du nombre de darcy ( $Da$ ) et du nombre de Grashof ( $Gr$ )

Afin d'observer les conséquences de la variation du nombre de darcy et de Grashof sur l'écoulement et sur les transferts thermiques, nous avons réalisé de différents résultats qui illustrent les lignes isothermes et les lignes de courant et les profils de vitesse axiale.

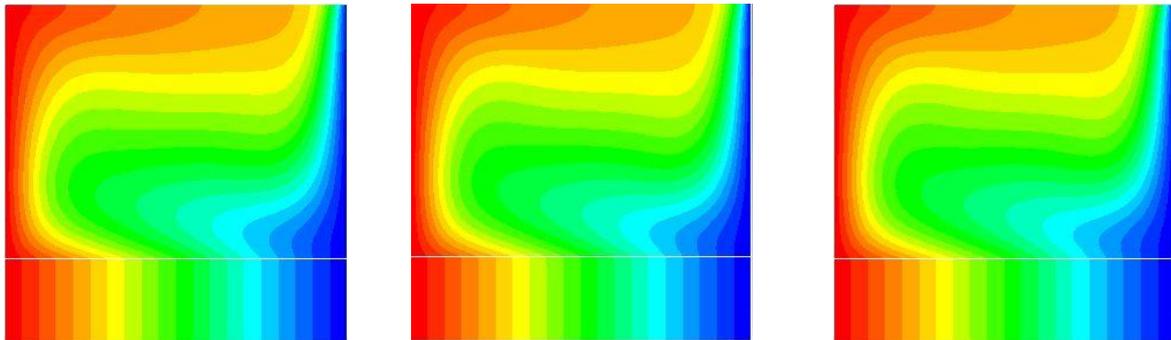
### III.4.1. Les lignes de courant et les isothermes

Pour un nombre de Grashof,  $Gr = 10^4$ ,

On prend :  $Pr = 0.71$ ,  $Re = 50$ ,  $10^{-3} \leq Da \leq 10^3$



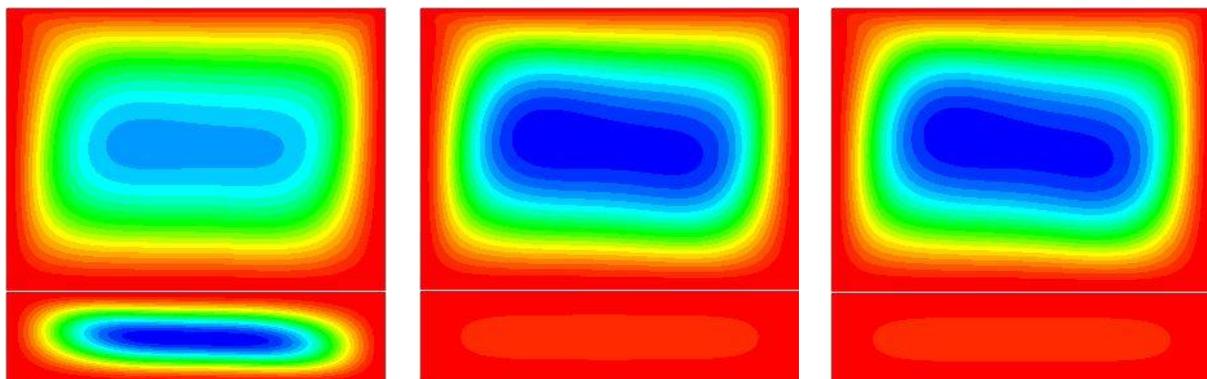
Da =  $10^{-3}$                       Da = 10                      Da =  $10^3$   
**Figure III.3 :** Lignes de courant pour différents nombres de Darcy ( $Gr = 10^4$ )



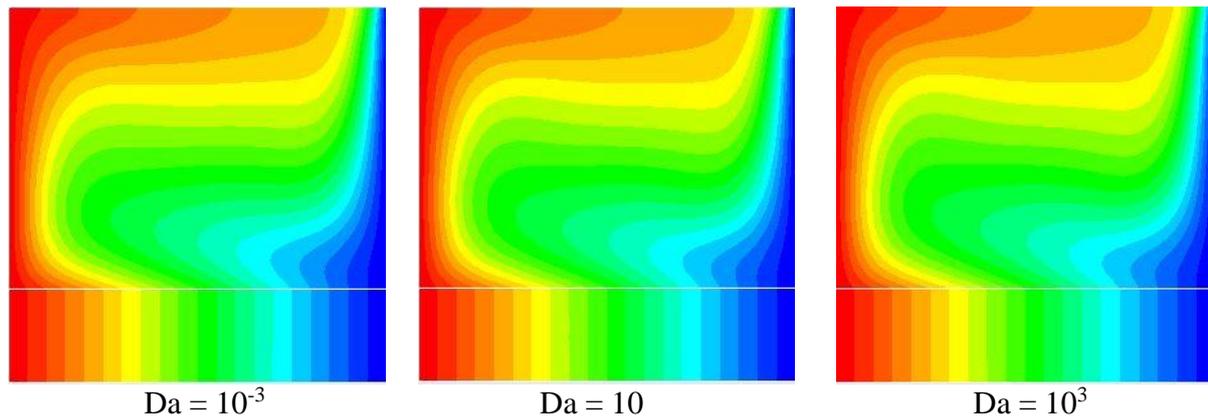
Da =  $10^{-3}$                       Da = 10                      Da =  $10^3$   
**Figure III.4 :** Lignes isothermes pour différents nombres de Darcy ( $Gr = 10^4$ )

Pour un Grashof,  $Gr = 10^5$

On prend :  $Pr = 0.71$ ,  $Re = 50$ ,  $10^{-3} \leq Da \leq 10^3$



Da =  $10^{-3}$                       Da = 10                      Da =  $10^3$   
**Figure III.5 :** Lignes de courant pour différents nombres de Darcy ( $Gr = 10^5$ )



**Figure III.6 :** Lignes isothermes pour différents nombres de Darcy ( $Gr = 10^5$ )

### III.4.2. Discussions

Pour les paramètres fixés auparavant, pour différents nombres de Darcy ( $Da$ ) et de Grashof ( $Gr$ ) les figures ci-dessus représentent les champs dynamiques et les champs thermiques. Pour un faible nombre de Darcy, une résistance à l'écoulement est remarquée dans le milieu poreux tandis que dans le milieu libre la circulation du fluide est plus favorable, et la convection naturelle est plus significative dans ce milieu. Dans la zone poreuse les lignes de température sont parallèles par rapport à la paroi chaude de la zone poreuse. Le milieu poreux dans cette situation se comporte comme un solide.

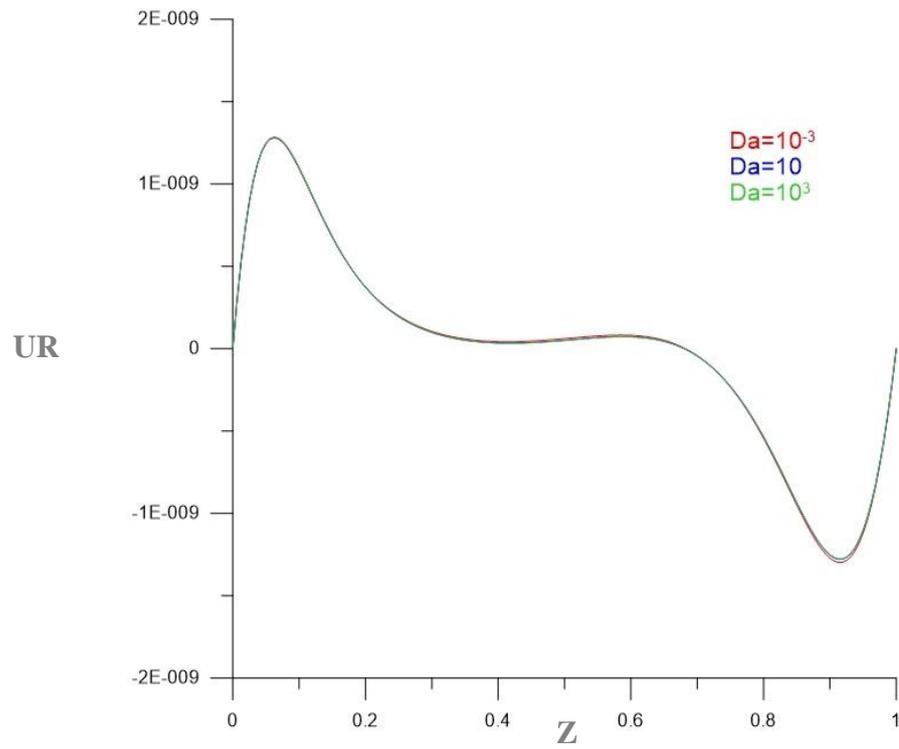
En prenant un nombre de Darcy de  $Da = 10$  on remarque une prolongation des lignes de courant dans la zone poreuse et une légère déformation des lignes isothermes. Pour un nombre de Darcy  $Da = 10^3$ , on remarque bien la dépendance de l'écoulement du nombre de Darcy vu que le milieu poreux dans ce cas se comporte comme un milieu libre.

En prenant un nombre de Grashof plus important ( $Gr = 10^5$ ), on remarque un changement dans les lignes isothermes vu que le gradient de température est plus important dans ce cas-ci. Tandis que pour un faible nombre de Grashof on voit bien une formation d'une situation conductive.

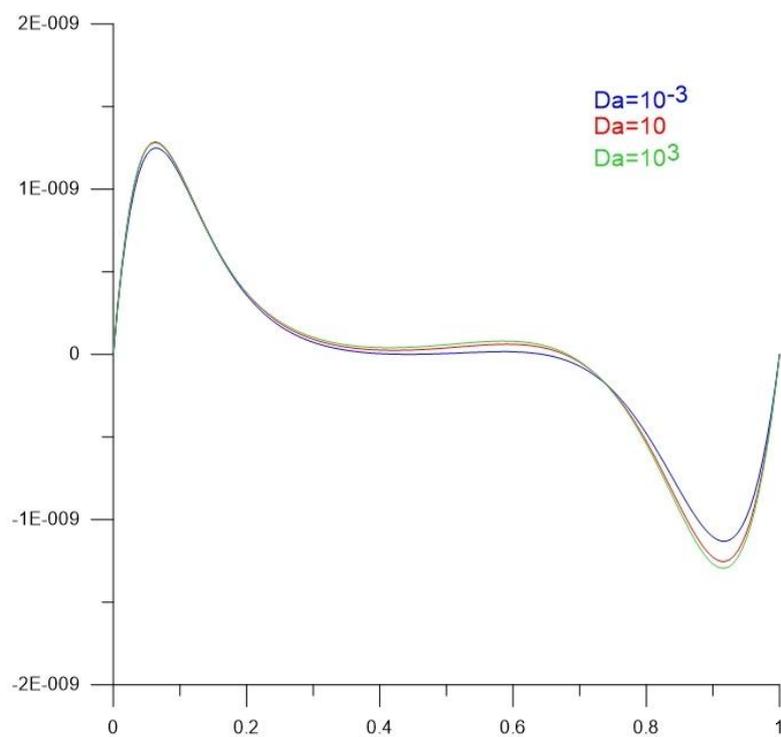
### III.4.3. Profil de vitesses

La figure qui suit représente la variation de la vitesse axiale en fonction de  $Z$ , pour différents nombres de Darcy et de Grashof, pour un  $Z = 0.5$ .

Pour un nombre de Grashof,  $Gr = 10^4$



**Figure III.7 :** Profil de vitesse axiale adimensionnelles pour différent nombre de Darcy  
( $Gr=10^4$ )



**Figure III.8 :** Profil de vitesse axiale adimensionnelles pour différent nombre de Darcy  
( $Gr=10^5$ )

#### III.4.4. Discussions

Les effets du nombre de Grashof pour différents nombres de Darcy sont illustrés dans la figure (3-4), (3-5). On remarque que lorsqu'on varie le nombre de Darcy, la vitesse augmente et le profil est d'une forme parabolique puis tend à prendre une forme plate avec une vitesse constante avant de diminuer jusqu'à la valeur de  $Z$  et augmenter à nouveau.

Lorsqu'on prend un nombre de Grashof plus important, on remarque bien une variation de la vitesse d'écoulement à la sortie du canal et ça pour plusieurs nombres de Darcy.

#### Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur les écoulements et le transfert thermique dans les milieux poreux. Les simulations ont été effectuées pour des valeurs de nombre de Darcy ( $Da$ ) et nombre de Grashof ( $Gr$ ) différentes.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Le milieu poreux a bien démontré son importance dans les processus industriels et technologique aujourd'hui. Diverses applications telles que le refroidissement des composants électroniques, la biomasse, le traitement thermique des déchets, le génie nucléaire, la conception et la fabrication des échangeurs de chaleur, continuent à faire l'objet de plusieurs travaux de recherche.

La présentation de ce travail est pour raison d'évaluer l'influence d'un milieu poreux dans un canal, pour une large gamme des paramètres thermo physique sur l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur. En se basant sur des équations gouvernante mise sous forme adimensionnelles, régi par le modèle de Darcy-Brinkman, la formulation mathématique a été établie.

La méthode des volumes finis est adoptée pour la réalisation du système basé sur l'algorithme simple. Les paramètres thermo physique sous forme adimensionnelle, on montrer leurs influences sur le comportement dynamique et thermique.

La présentation des résultats s'est concentrée sur les profils de vitesses et les profils des températures locales. L'exploitation et l'analyse des différents résultats obtenus ont permis d'aboutir à un certain nombre d'observations et de constatations

- Le nombre de Darcy ( $Da$ ) et le nombre de Grashof ( $Gr$ ), influent remarquablement les profils de vitesses axiale et température locale, en aillant un changement sur le développement des couches dynamique et thermique.
- L'effet de la matrice poreuse est très perceptible sur le profil des vitesses.
- L'introduction d'un milieu poreux à faible perméabilité, réduit l'épaisseur de la couche limite et augmente par conséquent les transferts thermiques.

En effet, la diminution de la perméabilité entraîne une diminution sensible des épaisseurs des couches limites, dynamique et thermique, ce qui rend les gradients pariétaux très importants et par conséquent, favorise transfert de chaleur par rapport au cas des milieux à perméabilité plus élevé.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1] **Fatah Mejni** : structure synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux, 2008, Lille. (Thèse)
- [2] **Kaci Fodil** : Simulation d'un déplacement immiscible eau-huile en milieu poreux, 2012, Tizi-Ouzou. (Mémoire)
- [3] **Charles Danquigny** : étude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène, 2003, Strasbourg. (Thèse)
- [4] **Bories, M. Prat** : Transferts de chaleur dans les milieux poreux, Techniques de l'ingénieur, Traité Génie Energétique, B8 250, 2005, pp.1-32. (Article)
- [5] **D.A. Nield, A. Bejan** : Convection in porous media, 2nd ed, Springer-Verlag, 1999. NewYork . (Mémoire)
- [6] **Olivier BONNEFOY** : Influence de cristaux d'hydrates de gaz ou de glace sur la perméabilité d'un milieu poreux, thèse de doctorat, 2005, Saint-Etienne. (Thèse)
- [7] **HANDBOOK OF POROUSE MEDIA**, second edition. Edited by Kambiz Vafai. 2005 by Taylor & Francis Group, LLC. (Livre)
- [8] **Alioui Smail** : Modélisation et simulation à base de méthodes numériques alternatives des déplacements diphasique en milieu poreux, thèse de magister, 2011. Boumerdes. . (Mémoire)
- [9] **Ahmad ALBITAR** : Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogène 2D/3D, avec couplages surface/souterrain et densitaires, 2007, Toulouse. (Thèse)

[10] **Zolzan E. HEIMANN**: Fluid flow in porous media, 2005, Leoben.

[11] **C.M. Marle** : Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieux poreux, 2006. Université Pierre et Marie Curie. (Mémoire)

[12] **Hussein HOTEIT** : Simulation d'écoulements et de transports de polluants en milieu poreux : Application à la modélisation de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs, Thèse de doctorat, 2002, université de Rennes1. (Thèse)

[13] **V. Gowda** : Discontinuous finite elements for nonlinear scalar conservation laws, Thèse de Doctorat, ,1988. Université Paris IX.

[14] **CÉDRIC BELLEIL** : Calcul direct des performances aérodynamique et acoustique d'un silencieux industriel par modélisation CFD, et optimisation aérodynamique, Maitrise, 2005, Montréal. (Thèse)

[15] **Suhas V. PATANKAR** « NUMERICAL HEAT AND FLUID FLOW ». Edited by Taylor and Francis. (Livre)

[16] **Tamay Basak** <sup>a</sup>, **S. Roy** <sup>b</sup>, **T.Paul** <sup>b</sup>, **I. Pop** <sup>c</sup>, Natural convection in a square cavity filled with porous medium. (Thèse)

## Résumé

### **Ecoulement d'un fluide dans un espace annulaire rempli d'une couche poreuse**

Notre travail porte sur la simulation d'un écoulement d'un fluide (air) dans un milieu poreux et un milieu libre, en présence d'un gradient thermique.

L'entrée du fluide dans les deux milieux est à une température élevée et quitte à une température plus basse.

Dans le but de voir l'influence de la couche poreuse ainsi que les autres paramètres dépendant du problème, nous avons étudié les caractéristiques de l'écoulement, l'analyse été faite pour nombre de Darcy (Da) varié et nombre de Grashof (Gr) différents.

En supposant que l'écoulement est axisymétrique et laminaire tout en adoptant l'approximation de Boussinesq.

La méthode des volumes fini utilisée par le code Fluent é été considérée pour discrétiser les équations gouvernantes

**Mots clés : Milieu poreux (1), Ecoulement fluide (2), Transfert de chaleur (3)**

---

## Abstract

### **Fluid flow in an annular space filled with a porous layer**

Our work concerns the simulation of a fluid flow (air) in a porous medium and a free medium, in the presence of a thermal gradient.

The fluid entering both media is at a high temperature and leaves at a lower temperature.

In order to see the influence of the porous layer as well as the other parameters depending on the problem, we studied the characteristics of the flow, the analysis was made for varied Darcy number (Da) and Grashof number (Gr) different.

Assuming that the flow is axisymmetric and laminar while adopting the Boussinesq approximation.

The finite volume method used by the Fluent code has been considered to discretize the governing equations.

We found that the Darcy number (Da) and the Grashof number (Gr), have an influence on the axial velocity and local temperature profiles, having a change on the development of the dynamic and thermal layers.

**Keywords: Porous medium (1), Fluid flow (2), Heat transfer (3)**

## Résumé

### **Ecoulement d'un fluide dans un espace annulaire rempli d'une couche poreuse**

Notre travail porte sur la simulation d'un écoulement d'un fluide (air) dans un milieu poreux et un milieu libre, en présence d'un gradient thermique.

L'entrée du fluide dans les deux milieux est à une température élevée et quitte à une température plus basse.

Dans le but de voir l'influence de la couche poreuse ainsi que les autres paramètres dépendant du problème, nous avons étudié les caractéristiques de l'écoulement, l'analyse été faite pour nombre de Darcy (Da) varié et nombre de Grashof (Gr) différents.

En supposant que l'écoulement est axisymétrique et laminaire tout en adoptant l'approximation de Boussinesq.

La méthode des volumes fini utilisée par le code Fluent é été considérée pour discrétiser les équations gouvernantes

**Mots clés : Milieu poreux (1), Ecoulement fluide (2), Transfert de chaleur (3)**

---

## Abstract

### **Fluid flow in an annular space filled with a porous layer**

Our work concerns the simulation of a fluid flow (air) in a porous medium and a free medium, in the presence of a thermal gradient.

The fluid entering both media is at a high temperature and leaves at a lower temperature.

In order to see the influence of the porous layer as well as the other parameters depending on the problem, we studied the characteristics of the flow, the analysis was made for varied Darcy number (Da) and Grashof number (Gr) different.

Assuming that the flow is axisymmetric and laminar while adopting the Boussinesq approximation.

The finite volume method used by the Fluent code has been considered to discretize the governing equations.

We found that the Darcy number (Da) and the Grashof number (Gr), have an influence on the axial velocity and local temperature profiles, having a change on the development of the dynamic and thermal layers.

**Keywords: Porous medium (1), Fluid flow (2), Heat transfer (3)**