

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Université Abderrahmane Mira De Béjaïa



Faculté des Sciences et des Sciences Exactes
Département physique

Mémoire de Master en Physique

Spécialité : Dynamique des fluides et énergétique

Thème

Contribution à l'étude de transfert thermique
dans les milieux poreux

Encadré par

— Professeur.Ouerdia OURREAD MEZIANI

Réalisé par

— Boualili ghilas
— Asloune lamine

Soutenu le 26 Juin 2023. devant le jury composé de :

Président

M.Amatousse Nawel

Professeur

Examineur

M. Bouchara Lydia

M.C.B

Année universitaire :2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le bon dieu qui nous a aidé à surmonter toutes les difficultés rencontrées au long de cette période pour mener à terme ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Professeur.Ouerdia OURRAD MEZIANI** ; Professeur au département de physique à l'université de Béjaïa, pour ce grand honneur qu'elle nous a accordé en acceptant de nous encadrer.

N'oublions surtout pas de remercier le **Professeur.Bachir MEZIANI** pour son aide précieuse qui a facilité la réalisation de la partie numérique de ce mémoire .

Nos remerciements aux membres de jury **Professeur.Amatousse Nawel** et Aassi **Docteur. Bouchara Lydia** qui nous font l'honneur d'examiner et juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier également nos familles et toutes personnes qui de près ou de loin ont contribué à ce modeste travail.

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié :

A nos chers parents qui nous ont soutenus et encouragés durant toute notre scolarité.

A nos frères et sœurs,

A nos enseignants,

A nos amis(e),

A toutes les personnes qui nous ont apportés de l'aide.

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence :

Je dédie ce modeste travail : A ma mère qui m'a guide durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été a mes cotes et ma soutenu durant toute ma vie, ma mère qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci ma mère..

A mon très cher père pour sa patience et tous ses efforts .

à ma chère sœur « fatima » et à ma chère sœur « Hiba » et à la mémoire de ma grand-mère « Bouaziz Dahbia » A mon très cher grand-père « Lounis » et ma très chère grand-mère « Thasaidith »

A ma promotrice Mme Ouerdia Ourrad Meziani Et Mr Bachir Meziani

A mes meilleurs amis « massinissa », « moloude », « ghilas.zikioue », « lyas lounase », « nouh », « daliz faycal ». En fin, je remercie mon amie mon binôme lamine qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail. A tous les enseignants, qui m'ont.

Table des matières

Introduction générale	8
1 Généralité sur les milieux poreux :	10
1.1 Introduction :	10
1.2 Définitions :	10
1.3 Types des milieux poreux :	11
1.4 Caractéristiques des milieux poreux :	13
1.4.1 Volume Élémentaire Représentatif (VER) :	13
1.4.2 La porosité :	14
1.4.3 La tortuosité :	16
1.4.4 La mouillabilité :	16
1.4.5 La perméabilité (intrinsèque, effective, relative) :	18
1.4.6 La topologie :	19
1.5 Equations fondamentales des écoulements en milieu poreux :	20
1.5.1 La loi de Darcy :	20
1.5.2 Loi de KOZENY :	24
1.5.3 Loi de Laplace :	24
1.6 remarque :	24
1.7 conclusion :	25
2 Les Transferts Thermiques dans les Milieux Poreux	26
2.1 Introduction :	26
2.1.1 Les différents modes de transferts :	27
2.1.2 Champ de température :	32
2.1.3 Gradient de température :	32
2.1.4 Flux de chaleur :	33
2.2 Bilan d'énergie :	33
2.3 Transfert thermique dans les milieux poreux :	34

2.3.1	Définitions :	34
2.3.2	Les types de transfert de chaleur dans les matériaux poreux :	35
2.3.3	La conduction dans les milieux poreux :	35
2.3.4	La convection dans les milieux poreux :	37
2.3.5	Le rayonnement dans les milieux poreux :	38
2.4	l'étude chronologique des types transfert thermique :	39
2.4.1	Etude de la conduction :	39
2.4.2	Rayonnement :	40
2.4.3	Convection :	41
2.5	Conclusion :	43
3	Simulation de transfert thermique dans les milieux poreux :	44
3.1	Introduction :	44
3.2	Formulation du problème :	44
3.3	Méthode de résolution numérique :	47
3.4	Résultats et Discussion :	48
	Conclusion générale	58

Table des figures

1.1	structure consolidée [1]	11
1.2	structure non consolidée [1]	12
1.3	: porosité d'interstice[18]	12
1.4	porosité à fissure[18]	13
1.5	représentation schématique d'un VER[4]	14
1.6	Evolution de la porosité totale d'une sphère centrée en un point P du milieu poreux en fonction de son rayon r.[1]	15
1.7	représentation de la tortuosité.[1]	17
1.8	mouillage d'un solide par deux liquides non miscibles [11]	17
1.9	déspositif de Darcy [15]	21
1.10	déspositif de Darcy.[17]	22
2.1	transfert de chaleur par convection.	28
2.2	Exemple de convection forcée.	29
2.3	transfert de chaleur par Conduction.	30
2.4	Schéma de transfert de chaleur par Rayonnement.	31
2.5	exemple des 3 modes de transfert thermique	32
2.6	Isotherme et gradient thermique	32
2.7	Système et bilan énergétique.	34
3.1	Bilan thermique sur un transfert 1D par conduction	45

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
A	Section (aire)	m^2
I	Intensité	-
K_{eq}	Conductivité thermique équivalente	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
L, Z	Longueur du milieu poreux	m
L_e	Longueur réelle des capillaires	m
Q	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
R_e	Nombre de Reynolds	-
T	Température	$^{\circ}C$
V_s	Volume du solide	m^3
V_v	Volume du vide	m^3
VER	Volume élémentaire représentatif	m^3
V_g	Volume gravitaire du fluide	m^3
a_g	Aire spécifique	L^{-1}
d	Diamètre de milieu	m
e	Indice du vide	-
h	Coefficient de transfert thermique par convection	$W.m^{-2}.C^{-1}$
h_z	Constante de KOZENY	-
k	Mouillabilité	m^2
k_r	Perméabilité relative	-
p	Pression	Pa
ρ_m	Densité de fluide	-
q_m	Vitesse moyenne de Darcy	$m.s^{-1}$
t_p	Température de la surface	$^{\circ}C$
t_{∞}	Température du milieu environnant la surface	$^{\circ}C$
β	Coefficient d'étalement (la mouillabilité)	-
ϵ	Facteur d'émission de la surface	-
γ	Tension interfaciale	-
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
λ_{eff}	Conductivité thermique effective	-
μ	Viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
ν	Vitesse	$m.s^{-1}$
σ	Constante de Stefan	$W.m^{-2}.K^{-4}$
τ	Tortuosité	-
θ	Angle de mouillage	-

Introduction générale

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de différents modes de transfert de chaleur dans les matériaux poreux.

Dans le premier chapitre, nous avons défini les pores, les milieux poreux, les matériaux poreux, et leurs caractéristiques, les types des pores, la tortuosité, la mouillabilité, la perméabilité et ses modes, la Topologie, on a aussi cité les formules fondamentales des écoulements en milieux poreux, on arrive à conclure que les propriétés des milieux poreux dépendent de leur structure, de leur taille de pore et de leur composition.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous avons traité les trois modes de transferts thermiques (Conduction, Convection, Rayonnement) qui s'y effectuent dans les matériaux en général et dans les matériaux poreux en particulier, nous avons aussi défini le champ et le gradient de température ainsi que le flux de chaleur et le bilan d'énergie, nous avons analysé les différents modes de transferts thermiques dans les matériaux poreux et la place qu'ils occupent dans la recherche à travers le classement des travaux effectués dans ce domaine dans l'ordre chronologique. Nous avons conclu que pour faire une étude complète sur les transferts thermiques dans les matériaux poreux, il faut tenir compte de ces trois modes de transfert sans exception.

Dans le dernier Chapitre, nous avons discuté du modèle numérique de transfert de chaleur (simulation). Nous avons en effet résolu l'équation de diffusion thermique (équation de conductivité) dans les milieux poreux. Nous nous intéressons à l'évolution de la chaleur pour différents milieux poreux en changeant le coefficient de conductivité thermique, qui change dans différents milieux poreux. Nous avons également examiné la solution de l'équation de chaleur pour plusieurs conditions aux limites à l'aide du schéma IMEX d'Eu-

ler, ce qui nous a permis d'obtenir une précision et une exactitude supérieures. Nous avons observé que ces conditions aux limites ont un impact sur le transfert de chaleur dans les milieux poreux.

Chapitre 1

Généralité sur les milieux poreux :

1.1 Introduction :

On désigne communément par milieu poreux un solide de forme complexe renfermant des cavités appelées pores. Ces cavités peuvent communiquer entre elles et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler et, éventuellement, échanger entre elles et/ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie.

La partie solide, encore appelée matrice, peut être déformable mais doit avoir une certaine cohésion, ce qui exclut de notre définition les lits fluidisés constitués de particules solides tenues en suspension sous l'effet d'un écoulement du fluide interstitiel.

Les milieux poreux sont d'une très grande variété, aussi bien de structure (forme et taille des grains et des pores de la matrice) que de nature (propriétés physico-chimiques des matériaux constitutifs) ou d'échelles spatiales (plusieurs dizaines de kilomètres cubes pour les gisements d'hydrocarbures et les nappes d'eau souterraines, à quelques millimètres cubes pour certains types de membranes filtrantes). Les milieux poreux occupent une large place et jouent un rôle important dans de nombreux secteurs industriels et phénomènes naturels. En se limitant à quelques exemples typiques, on peut notamment citer : le Génie pétrolier, le génie chimique et l'électrochimie, l'hydrogéologie, la géothermie, le génie thermique, le génie civil, la médecine, la biochimie...

1.2 Définitions :

Les milieux poreux sont des matériaux qui ont des pores ou des es-

paces vides à l'intérieur. Ils peuvent être trouvés dans diverses formes telles que des sols, des roches, des éponges, des tissus biologiques et des matériaux synthétiques comme les mousses et les polymères poreux. Ces milieux poreux sont d'une grande importance dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie des sols, la géologie, la biologie, la chimie et l'ingénierie des matériaux. Les propriétés des milieux poreux dépendent de la taille, de la forme et de la distribution des pores ainsi que des propriétés des matériaux constitutifs. Les milieux poreux ont des caractéristiques particulières qui les différencient des milieux pleins. Ils permettent la circulation de fluides et le transfert de matière à travers eux, et sont donc souvent utilisés pour la filtration, la séparation, la catalyse, le stockage d'énergie, et d'autres applications technologiques. La compréhension des milieux poreux est donc cruciale pour la modélisation et la simulation de nombreux phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu à leur intérieur [1].

1.3 Types des milieux poreux :

Les milieux poreux sont de très vaste variété et de nature. en particulier du point de vue de la structure géométrique délimitant l'espace poral. Leur classification se fait selon [1] :

la matrice solide : on distingue

La matrice consolidée : Les particules de la phase solide sont très compactes, difficiles à diviser. dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roches calcaires, grès, argiles, bois, céramiques, poudres frittées, tissus végétaux et animaux...).



FIGURE 1.1 – structure consolidée [1]

Matrice granulaire (non consolidée) : la phase solide est alors formée de grains ou de fibres non soudés entre eux (graviers, sables, limons, billes de verre et d'acier, matériaux divers...); les billes de verre sont notamment très utilisées en laboratoire pour étudier les phénomènes de transfert en milieu poreux.[1]



FIGURE 1.2 – structure non consolidée [1]

Les pores : on distingue.

Porosité d'interstice : La porosité d'interstice représente les vides autour des particules solides plus ou moins liés les uns aux autres. . [2]

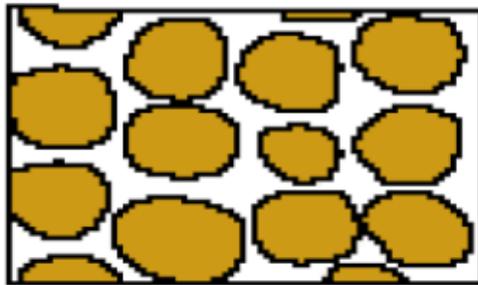


FIGURE 1.3 – : porosité d'interstice[18]

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

Remarque :

En général, ces deux types de porosité peuvent cohabiter comme dans les roches par exemple.



FIGURE 1.4 – porosite a fissure[18]

Matériaux	Porosité
Tourbe	60-80
Argile	45-55
Sable	30-40
Grès	10-20
Sols	50-60
Silt	40-50
Gravier	30-40
Calcaire	1-10

TABLE 1.1 – Porosité de quelques matériaux [8]

1.4 Caractéristiques 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] . Pour caractériser un milieu poreux, on doit tout d'abord définir un Volume Élémentaire Représentatif (VER).[4]

1.4.1 Volume Élémentaire Représentatif (VER)

Pour quantifier un problème de physique, en utilisant les outils mathématiques existants, il est nécessaire d'avoir un milieu continu pour établir des relations aux dérivées partielles. Dans les milieux poreux, les propriétés physiques

(porosité, perméabilité, etc.) sont discontinues au niveau microscopique. La dérivation de solutions de problèmes d'écoulement doit donc toujours faire appel, implicitement ou explicitement, à la définition d'un volume élémentaire représentatif VER à l'intérieur duquel les propriétés moyennes des fluides et des matériaux sont supposées uniformes et continues.[4]

Le VER doit être suffisamment grand pour que des propriétés globales moyennes puissent être définies sans que les fluctuations d'un pore à l'autre ne soient significatives (la taille l du VER doit être suffisamment grande à la taille du pore d). Le VER doit cependant être suffisamment petit pour que les variations d'un paramètre dans le domaine d'étude puissent être représentées par des fonctions continues (la taille l du VER doit être suffisamment petite par rapport à la taille caractéristique du milieu L). Marsily [5] et surtout Bear [6] fournissent une discussion détaillée de ce concept ainsi que des méthodes utilisées pour dériver les propriétés moyennes des milieux poreux.

Il existe cependant d'autres procédures de changement d'échelle, comme la méthode la plus récente d'homogénéisation (Sanchez-Palencia.[7]) Cette méthode qui repose essentiellement sur des développements asymptotiques de la vitesse et de la pression à l'échelle du pore , puis à une application d'un opérateur moyen d'intégration pour passer à l'échelle macroscopique, a permis de justifier les termes supplémentaires des lois de quantité de mouvement.[4]

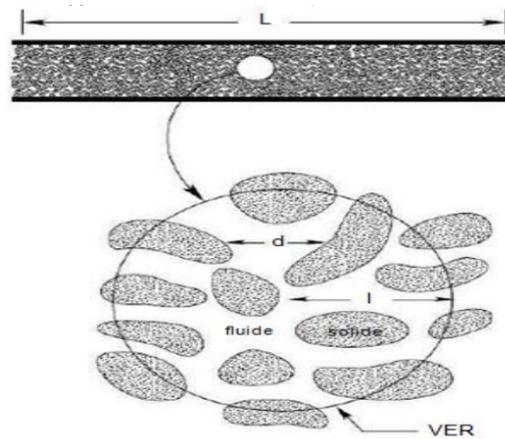


FIGURE 1.5 – représentation schématique d'un VER[4]

1.4.2 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

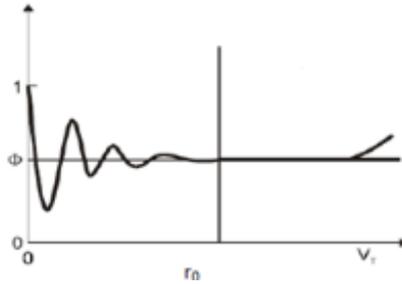


FIGURE 1.6 – Evolution de la porosité totale d’une sphère centrée en un point P du milieu poreux en fonction de son rayon r.[1]

volume total du matériau [4].

$$V_t = V_v + V_s \quad (1.1)$$

Lorsque le volume total considéré est unitaire, la somme ci-dessus est égale à l’unité. La Porosité est définie comme étant le rapport du volume des pores d’un milieu poreux V_v sur son volume total V_t :

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.2)$$

ϕ varie donc entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide). Puisqu’il s’agit d’un rapport de mêmes propriétés, la porosité n’a pas d’unité et elle est souvent exprimée en pourcentage.

Un autre paramètre caractérisant la proportion des pores dans un matériau poreux est l’indice du vide ‘e’. Il est défini par le rapport du volume des vides V_v sur celui des solides V_s .

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.3)$$

Ce paramètre est d’usage courant en géotechnique car il a l’avantage d’utiliser un volume de référence (celui des solides) qui demeure constant contrairement au volume total qui peut varier considérablement dans les matériaux fortement compressibles tels que les silts et argiles. Le lien entre la porosité et l’indice du vide est exprimé par :

$$\phi = \frac{e}{e + 1} \quad (1.4)$$

Par ailleurs, on définit une porosité efficace, ou porosité libre en relation avec la définition de l’eau libre par le rapport du volume d’eau (V_g) que peut

le milieu poreux sous l'action des seules forces de gravité au volume total (V_t).

$$\phi_e = \frac{V_g}{V_t} \quad (1.5)$$

Remarque :

En général, on prend la porosité comme une fonction constante par morceaux en fonction de la nature de la roche réservoir. Dans des cas industriels, on peut aussi prendre la porosité comme une fonction faiblement variable (linéairement décroissante) de la pression et/ou de la profondeur.[9] Les matériaux sont dits :

- a porosité faible, si $\phi < 5\%$;
- a porosité médiocre, si $5\% \leq \phi < 10\%$;
- a porosité moyenne, si $10\% \leq \phi < 20\%$;
- a porosité bonne, si $20\% \leq \phi < 30\%$;
- a porosité excellente, si $\phi > 30\%$.

1.4.3 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[10] :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (1.6)$$

où est la longueur réelle des lignes de courant du fluide traversant un échantillon de longueur 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.

1.4.4 La mouillabilité :

La mouillabilité est la capacité d'un fluide à recouvrir une surface solide ou un autre liquide. L'angle caractéristique définissant la mouillabilité d'un fluide est nommé angle de contact (ou angle de mouillage) et est noté θ . Cet angle est mesuré à l'intérieur de l'un ou l'autre des fluides en présence . D'un point de vue qualitatif, la définition de la mouillabilité est la suivante : une

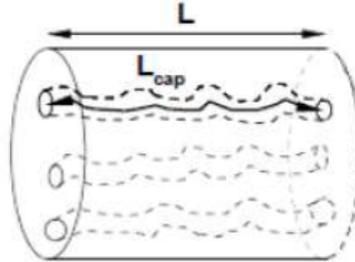


FIGURE 1.7 – représentation de la turtuosité.[1]

surface est en contact avec deux fluides séparés par une interface, cette surface est d'autant plus mouillable à l'un de ces fluides que l'angle de contact est proche de zéro. Toutefois, l'angle de contact n'a pas une valeur fixe et celle ci dépend du processus de mise en place des fluides ainsi que des propriétés de la paroi solide. Elle diffère également selon que les fluides sont statiques ou mobiles. On définit un coefficient d'étalement, β dont le signe permet de déterminer si le mouillage est total ($\beta \geq 0$) ou partiel ($\beta \leq 0$) [11].

$$\beta = \gamma_{\theta_1} - (\gamma_{\theta_2} + \gamma_{\theta_1\theta_2}) \quad (1.7)$$

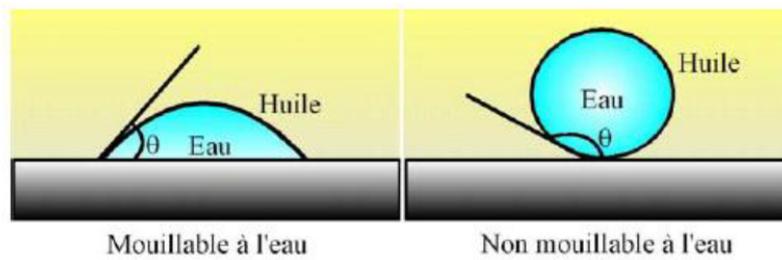


Figure 1.8 : mouillage d'un solide par deux liquides non miscibles [11]

On notera que si les propriétés de mouillage ou de mouillabilité sont bien définies à l'échelle de la surface (échelle du pore), la mouillabilité d'un milieu poreux, qui est une propriété macroscopique, est évaluée par diverses méthodes expérimentales. Un milieu poreux est dit mouillable à un fluide si ce fluide tend à déplacer spontanément un autre fluide initialement présent ; les milieux constitués de minéraux tels que la silice sont généralement mouillables à l'eau. Cependant, certaines roches calcaires sont préférentiellement mouillables à l'huile. Dans le cas des gisements pétroliers, on peut rencontrer des roches dans un état de mouillabilité mixte, où une partie de la roche sera mouillable à l'huile tandis que le reste sera mouillable à l'eau. Cela est principalement

dû au fait que les roches réservoirs sont constituées de minéraux ayant des mouillabilités très différentes. Il est possible qu'une roche mouillable initialement à l'eau ne le soit plus après le passage d'un liquide complexe comme une huile de gisement.

La mouillabilité ayant une influence importante sur les écoulements polyphasiques, sa connaissance exacte dans les milieux poreux utilisés est essentielle pour avoir une idée de la répartition des fluides à l'échelle microscopique.

A partir de la mouillabilité, les notions d'imbibition et de drainage peuvent être définies. L'imbibition est le déplacement d'un fluide non-mouillant par un fluide mouillant (pour un milieu mouillable à l'eau, le déplacement de l'huile par l'eau). Inversement, le drainage est le déplacement d'un fluide mouillant par un fluide non-mouillant (pour un milieu mouillable à l'eau, le déplacement de l'eau par l'huile).

1.4.5 La perméabilité (intrinsèque, effective, relative):

La perméabilité intrinsèque :

La perméabilité intrinsèque ou absolue d'une roche est l'aptitude de cette roche à laisser circuler à travers ses pores un fluide dont elle est saturée. Elle peut être chiffrée grâce à la loi expérimentale de darcy.

Considérons un échantillon de longueur dx et de section A , saturé d'un fluide de viscosité dynamique et traversé horizontalement par un débit Q (mesuré dans les conditions de la tranche dx). En régime permanent, la pression amont est P et la pression aval est $P-dp$.

Dans le cas des écoulements polyphasiques, la perméabilité intrinsèque définie précédemment, n'est plus suffisante pour décrire la perméabilité effective du milieu traversé par l'une des phases considérées. En effet, une perméabilité dite "relative" est introduite. Cette perméabilité tient compte de la présence des autres phases.[12]

le tableau ci-dessous donne les valeurs de la perméabilité de quelques matériaux :[1]

Matériaux	Perméabilité K en (m ²)
Ardoise noire en poudre	$4.9 \times 10^{-14} - 1.2 \times 10^{-13}$
Brique	$4.8 \times 10^{-15} - 2.2 \times 10^{-13}$
Béton bitumineux	$1 \times 10^{-13} - 2.2 \times 10^{-11}$
Cuivre (en poudre)	$3.3 \times 10^{-10} - 1.5 \times 10^{-9}$
Calcaire (dolomite)	$2 \times 10^{-15} - 4.5 \times 10^{-14}$
Cuir	$9.5 \times 10^{-14} - 1.2 \times 10^{-14}$
Poudre de silice	$1.3 \times 10^{-14} - 5.1 \times 10^{-14}$
Sable	$2 \times 10^{-14} - 1.8 \times 10^{-10}$
Grés	$5 \times 10^{-16} - 3 \times 10^{-12}$
Sol	$2.9 \times 10^{-13} - 1.4 \times 10^{-13}$
terre	$2.9 \times 10^{-13} - 1.4 \times 10^{-11}$

Table 1.2 : valeurs de perméabilité de certains matériaux [1]

La perméabilité effective:

En pratique dans les gisements d'hydrocarbures, il y a toujours au moins deux phases fluides présentes (eau-hydrocarbure). La loi de darcy permet alors de définir, pour chacune des phases une perméabilité effective. La perméabilité effective dépend à la fois de la perméabilité du milieu et de la saturation du fluide considéré.[13]

Perméabilité relative:

A cause de la présence de ces différentes phases, chaque phase n'occupe qu'une partie des pores. Le débit de chaque fluide ne peut donc plus être calculé simplement à partir de la perméabilité de la roche. On introduit donc le concept de la perméabilité relative. Elle décrit le point auquel un fluide est gêné.

1.4.6 La topologie:

La manière dont les pores et les grains sont connectés constitue la topologie du milieu poreux. Celle-ci peut notamment se caractériser par les grandeurs suivantes :

La coordinence d'un grain qui est le nombre des grains qui sont en contact avec lui. Pour un empilement compact de sphères identiques, la coordinence

est égale à 12. Dans une structure cubique centrée, elle est de 8. Cette notion s'applique également aux pores. Les roches sédimentaires ont une coordination moyenne des pores comprise entre 4 et 8 .[1]

1.5 Equations fondamentales des écoulements en milieu poreux :

Les formules générales décrivant l'écoulement dans les milieux poreux écrite dans un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) à l'échelle macroscopique, sont la loi expérimentale de Darcy et l'équation de continuité.

1.5.1 La loi de Darcy:

Écoulement monophasique:

En 1855, Darcy mit en évidence une formule en présence d'un seul fluide (écoulement monophasique) à Dijon après 35 expériences dans les quelles fait varier le débit d'écoulement de l'eau de 2.13 à 29.4 ; à travers une colonne de 2.5 m de hauteur et 0.35 m de diamètre, qui porte son nom aujourd'hui.[14] L'eau souterraine s'écoule des niveaux d'énergie plus élevés vers les niveaux d'énergies plus faibles. Cette énergie est essentiellement le résultat de l'altitude et de la pression. La loi de Darcy en milieu poreux exprime la vitesse de filtration en régime permanent ou transitoire en fonction du gradient de pression et de la gravité. Pour un fluide incompressible, la loi de Darcy s'écrit sous la forme générale[6][15].

$$\vec{u} = - \frac{K(\overrightarrow{\text{grad}p} - \rho\vec{g})}{\mu} \quad (1.8)$$

ou:

\vec{u} :le vecteur vitesse de Darcy,

K :la perméabilité intrinsèque du milieu,

μ :la viscosité du fluide

p :la pression,

ρ :la masse volumique du fluide,

\vec{g} :le vecteur de gravité.

La loi de Darcy est une loi empirique en hydrodynamique qui décrit le débit d'un fluide à travers un milieu poreux, tels que les sols, les roches ou les filtres. Elle énonce que le débit d'eau à travers un milieu poreux est directement proportionnel à la différence de pression hydraulique entre deux

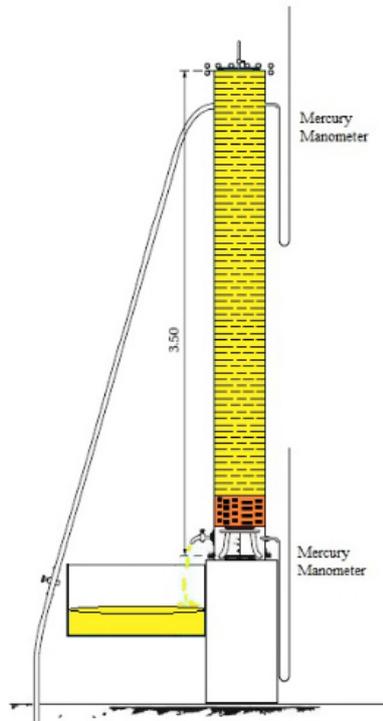


Figure 1.9 : déspositif de darcy [15]

points, inversement proportionnel à la résistance du milieu. Elle est exprimée mathématiquement par l'équation : $Q = -KA (d_h/d_l)$.

Où Q est le débit volumique, K est la conductivité hydraulique du milieu, A est la section transversale du milieu, d_h/d_l est la pente hydraulique ou gradient hydraulique et est la différence de charge hydraulique entre deux points. Cette loi est largement utilisée en ingénierie des sols, en hydrogéologie et dans d'autres domaines liés à la gestion de l'eau souterraine.

La loi de Darcy est utilisée pour modéliser les écoulements d'eau souterrains, la recharge des nappes phréatiques, la circulation des fluides dans les réservoirs pétroliers, la filtration des eaux usées, la migration des polluants dans les sols, la conception des ouvrages de génie civil, etc. Elle est donc un outil essentiel dans de nombreux domaines qui impliquent des écoulements de fluides dans des milieux poreux.

Écoulement diphasique:

il s'agit d'un écoulement de deux fluides immiscibles (eau-huile) qui

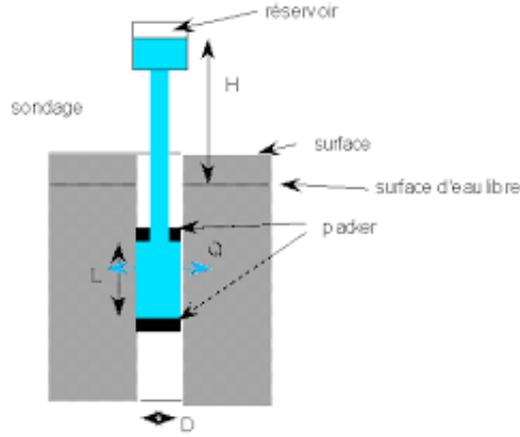


Figure 1.10 : déspositif de Darcy.[17]

est régi par la formule généralisée de Darcy, utilisable à des faibles vitesses.[5]

$$\vec{U}_w = -K_{rw}(s) \frac{K}{\mu_w} (\overrightarrow{\text{grad}} P_w - p_w \vec{g}) \quad (1.9)$$

$$\vec{U}_o = -K_{ro}(s) \frac{K}{\mu_o} (\overrightarrow{\text{grad}} P_o - p_o \vec{g}) \quad (1.10)$$

avec : ρ : la masse volumique . \vec{U}_w et \vec{U}_o : les vitesses de l'eau et d'huile.
 K_{rw} et K_{ro} : les perméabilités des deux fluides.
 K : la perméabilité du domaine en (x, y) .
 μ_w et μ_o : les viscosité dynamiques d'eau et d'huile.
 P_w et P_o : les pressions des deux phases.
 p_w et p_o : les masses volumiques des deux fluides.

Nous considérons, malgré la présence de deux phases fluides, que la perméabilité du milieu reste inchangée. Nous supposons également que le milieu étudié est horizontal d'épaisseur négligeable.

Loi de la conservation de masse:

Cette équation traduit le fait que la somme de la variation de la masse de fluide à l'intérieur d'un volume élémentaire au cours du temps et des flux massiques le traversant (entrant + sortant) est nul[16].

$$\phi \frac{\partial(\rho s)}{\partial T} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1.11)$$

Equation de pression:

La combinaison de l'équation de Darcy et la loi de conservation de masse en négligeant la variation de la masse volumique, nous donne :

$$\phi \frac{\partial(S_w P_w)}{\partial T} - \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{K}{\mu_w} \cdot (\overrightarrow{\text{grad}} P_w) \right] = 0 \quad (1.12)$$

$$\phi \frac{\partial(S_0 P_0)}{\partial T} - \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{K}{\mu_0} \cdot (\overrightarrow{\text{grad}} P_0) \right] = 0 \quad (1.13)$$

Régime d'écoulement

Pour que la loi de Darcy soit valide, il faut que l'écoulement soit laminaire, ce qui est généralement le cas dans les milieux poreux. La vérification de cette condition se fait à l'aide du nombre de Reynolds. . En mécanique des fluides, mesure l'importance des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité. Il est donné par :

$$Re = \frac{q_m p_m d}{\mu} \quad (1.14)$$

avec :

q_m : La vitesse moyenne de Darcy

p_m : La densité du fluide

d : Le diamètre des grains

μ : La viscosité dynamique du fluide

Pour les écoulements en milieux poreux, d est égale au diamètre effectif des grains d_{10} (la taille du filtre à travers duquel 10% en masse des grains passe) .

N.B: Afin que la loi de Darcy soit applicable, il faut que $Re \leq 6$. [1]

1.5.2 Loi de KOZENY

La chute de pression (ou perte de charge) subie par un liquide à la traversée d'une longueur Z de milieu poreux peut être calculée, si le régime d'écoulement est laminaire, par la loi de KOZENY

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_k \frac{a_g^2 (1 - \phi)^2}{\phi^3} \eta \cdot \mu_m \quad (1.15)$$

$$a_g = \frac{A_g}{v_g} \quad (1.16)$$

a est l'aire spécifique de grain, c'est l'aire de la surface en contact avec le liquide correspondant à un volume unité de solide. Si le volume de solide constituant le milieu poreux est V_g et si la surface de contact correspondante est A_g , l'aire spécifique est :

$$[a_g] = L^{-1} \quad (1.17)$$

1.5.3 Loi de Laplace :

La loi de Laplace décrit la relation entre la différence de pression (P) à travers une interface courbe entre deux phases immiscibles d'un fluide et le rayon de courbure de l'interface (r). Elle est souvent utilisée pour étudier les phénomènes de capillarité dans les milieux poreux.

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (1.18)$$

avec :

γ : la tension interfaciale .

1.6 remarque:

Ces lois et équations ne représentent qu'une partie des nombreux outils mathématiques utilisés pour étudier les milieux poreux. Selon le domaine d'étude spécifique, d'autres équations et modèles peuvent également être utilisés.

1.7 conclusion:

Les milieux poreux sont des matériaux qui présentent des pores ou des espaces interconnectés à l'intérieur de leur structure. Ces milieux sont présents dans de nombreux domaines, tels que la géologie, l'ingénierie des matériaux, la biologie, la médecine et l'environnement.

Les milieux poreux peuvent avoir des propriétés uniques, telles que leur capacité à stocker et à transporter des fluides, à fournir des surfaces pour la croissance de micro-organismes et à servir de filtres pour les particules. Les propriétés des milieux poreux dépendent de leur structure, de leur taille de pore et de leur composition.

Les milieux poreux ont des applications variées, notamment dans la production de pétrole et de gaz, la filtration de l'eau, la conception de matériaux à haute performance, la biologie cellulaire et la médecine régénérative. La compréhension de la structure et des propriétés des milieux poreux est donc essentielle pour le développement de nouvelles technologies et l'amélioration des processus existants dans de nombreux domaines.

En conclusion, les milieux poreux sont des matériaux fascinants et importants dans de nombreux domaines. Ils présentent des propriétés uniques qui peuvent être exploitées pour diverses applications et leur étude reste un domaine de recherche actif et en évolution constante.

Chapitre 2

Les Transferts Thermiques dans les Milieux Poreux

2.1 Introduction :

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures.

On dit qu'il y'a transfert de chaleur. Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique, mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour expliquer de quelle manière s'effectue le transfert de chaleur ou pour prévoir la vitesse de ce transfert. Il existe trois modes de transfert d'énergie thermique :

la conduction, la convection et le rayonnement thermique.

La conduction se produit lorsque les flux de chaleur passent d'un corps à un autre, par contact. On parle de convection lorsqu'un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient.

En pratique, les transferts de chaleur dans les systèmes industriels peuvent impliquer l'utilisation de plusieurs de ces mécanismes simultanément.

La résolution de problèmes de transfert de chaleur implique souvent la compréhension des mécanismes impliqués et la mise en œuvre de stratégies pour améliorer l'efficacité du transfert de chaleur ou pour minimiser les pertes de chaleur. Les réponses apportées à ces trois questions nous permettrons de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu dans les transferts de chaleur et d'en apprécier l'importance dans plusieurs problèmes et configurations industrielles, liés à des applications environnementales et économiques. Par définition, un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une inter-

action énergétique qui résulte d'une différence de température entre eux. On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique ou diffusion thermique ;
2. Le rayonnement thermique ;
3. La convection;

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques et font ainsi l'objet de chapitres différents, cependant, seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide. Pourtant, ce mode de transfert est plus difficile à étudier, car il mélange de manière intime échange de chaleur et transfert de masse. Les applications directes en sont aussi très larges, à la fois en convection libre et surtout en convection forcée. En outre il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode ; le plus souvent deux sinon trois modes entrent en jeu. Il sera donc nécessaire de poser correctement les problèmes pour prendre en compte ces différents mécanismes.

2.1.1 Les différents modes de transferts:

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes.

Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat).

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction.

Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m^2). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur: la conduction, le rayonnement et la convection.

La convection:

est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air), ainsi qu'aux éléments déformables (comme les roches à hautes pressions dans le manteau terrestre), elle est liée au mouvement du fluide, donc à un transport de matière. L'état fluide regroupe l'état gazeux et l'état liquide qui ont la faculté d'être déformables. Il

s'adaptent à la forme du récipient offert, et peuvent s'écouler[23].

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \quad (2.1)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

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

T_p : Température de la surface (c°)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (c°)

S : Aire de la surface (m^2)

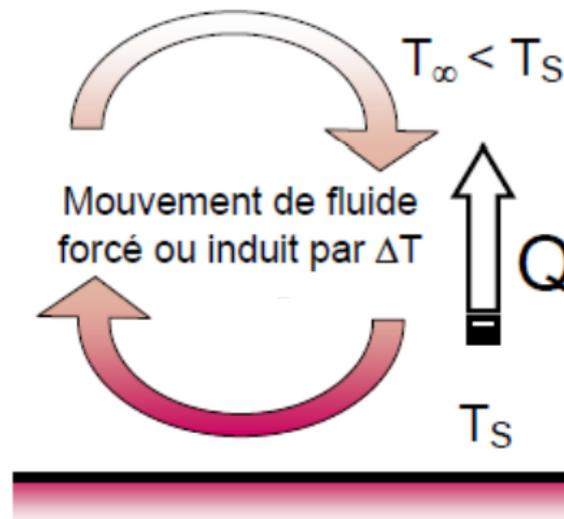


Figure 2.1 : transfert de chaleur par convection.

La convection forcée: La convection forcée est un type particulier de transfert de chaleur dans lequel les fluides sont forcés de se déplacer, afin d'augmenter le transfert de chaleur. Ce forçage peut se faire avec un ventilateur de plafond, une pompe, un dispositif d'aspiration, ou autre.[27]

La convection naturelle: lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il y aura ainsi circulation naturelle du fluide sous l'effet de la chaleur qui, par ailleurs, sera transportée avec lui: on parle de convection

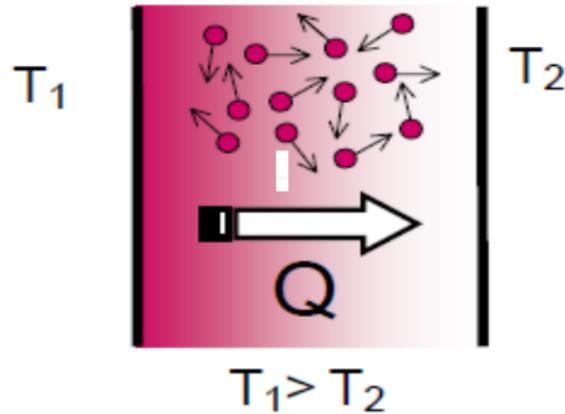


Figure 2.2 : Exemple de convection forcée.

naturelle. Si l'on prend l'exemple d'un chauffage domestique, l'eau chaude qui arrive dans les radiateurs circule par convection forcée, entretenue par le circulateur (petite pompe située dans la chaufferie) tandis que l'air des pièces de la maison circule par convection naturelle depuis le radiateur autour duquel il s'échauffe jusqu'au plafond vers lequel il s'élève avant de redescendre pour former un circuit fermé.

Exemple de convection *Lorsque que l'on met ses mains au dessus d'un feu de cheminée (ou de barbecue), on ressent de l'air chaud, en effet celui-ci est produit par convection. En effet, la convection se fait grâce aux molécules d'air (dioxygène, diazote), qui se trouvent au-dessus du feu (ou d'une plaque chauffante) ; ces molécules montent vers le haut, où il fait plus froid (lors de leur montée, elles entrent en contact avec la main, d'où la sensation de chaleur). Lorsqu'on souffle sur une cuillerée de soupe brûlante, elle refroidit plus vite (les molécules du fluide chaud sont remplacées par de nouvelles molécules à plus basse température).*

Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduc-

tion repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [21] :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.2)$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

λ : conductivité thermique du milieu

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

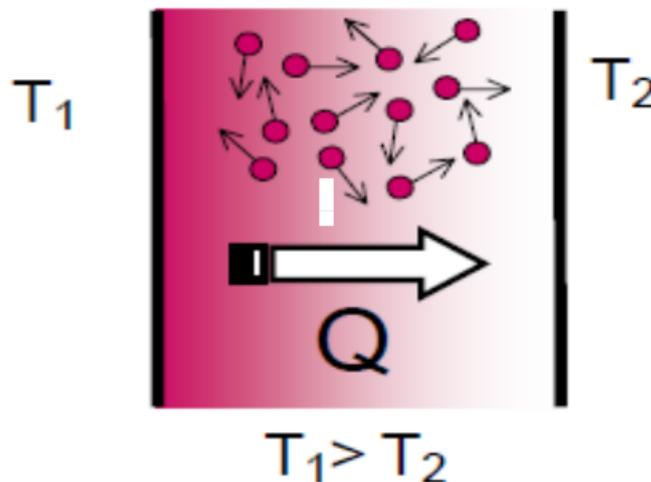


Figure 2.3 : transfert de chaleur par Conduction.

Le rayonnement:

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber,

ce qui l'augmente. De par sa nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaque (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau)[23].

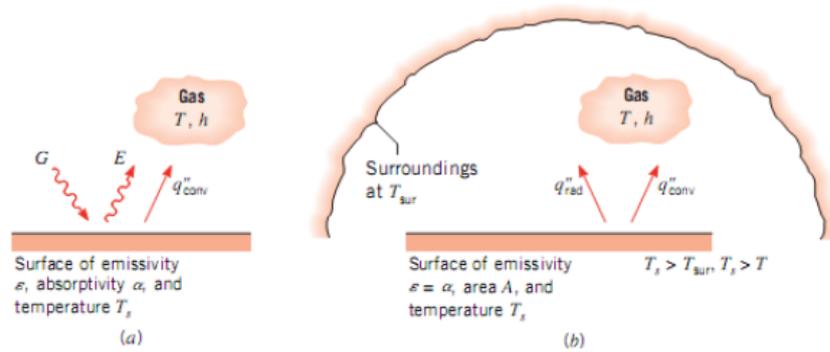


Figure 2.4 : Schéma de transfert de chaleur par Rayonnement.

$$\varphi = \sigma \epsilon S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (2.3)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ϵ : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K°)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K°)

S : Aire de la surface (m^2)

Exemple de rayonnement: En été, le fort rayonnement du Soleil fait chauffer le carrelage des terrasses extérieures. En effet, le rayonnement se fait grâce aux ondes électromagnétique émises par le Soleil, réchauffant alors le carrelage qui capte ces ondes électromagnétique. Le meilleur exemple regroupant ces trois modes de transfert thermique est celui de la casserole pleine d'eau qui chauffe, comme le montre le schéma ci-dessous [25] :

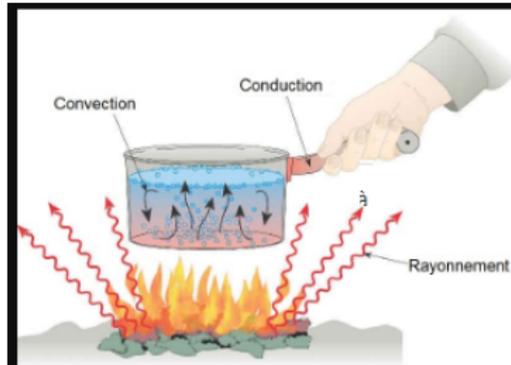


Figure 2.5 : exemple des 3 modes de transfert thermique .

2.1.2 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$.

La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas : - Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire. - Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire..

2.1.3 Gradient de température :

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température[24] :

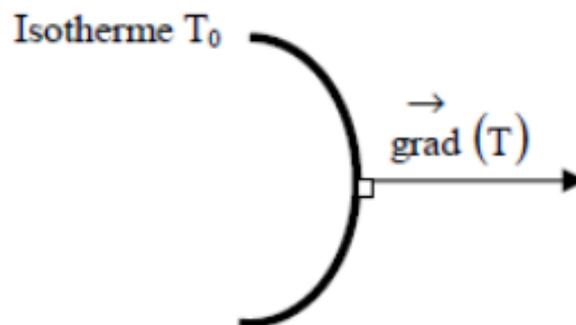


Figure 2.6 : Isotherme et gradient thermique .

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.4)$$

Avec :

\vec{n} : vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

2.1.4 Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (2.5)$$

Où S est l'aire de la surface (m^2). On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps .

$$\varphi = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (2.6)$$

2.2 Bilan d'énergie:

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être [19] :

avec:

φ_{st} :flux de chaleur stocké .

φ_g :flux de chaleur généré .

φ_e :flux de chaleur entrant .

φ_s :flux de chaleur sortant .

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) : $\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$ On obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

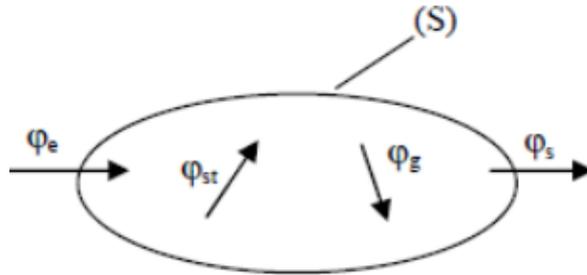


Figure 2.7 : Système et bilan énergétique.

2.3 Transfert thermique dans les milieux poreux:

2.3.1 Définitions :

Le transfert thermique dans les milieux poreux est un domaine d'étude important dans de nombreux domaines de l'ingénierie et de la physique. Le transfert de chaleur dans ces milieux est un processus complexe qui implique l'échange de chaleur entre un fluide et un solide à travers un réseau de pores. Le transfert thermique dans les milieux poreux est influencé par de nombreux facteurs, tels que la conductivité thermique du matériau solide, la taille des pores, la vitesse et la nature du fluide qui circule à travers les pores. La compréhension de ces facteurs et de leur impact sur le transfert thermique dans les milieux poreux est essentielle pour optimiser les conceptions des systèmes et améliorer leur efficacité. Ces mécanismes sont influencés par la structure et les propriétés des milieux poreux, ainsi que par les conditions de fonctionnement des systèmes. La modélisation mathématique est largement utilisée pour étudier le transfert thermique dans les milieux poreux et optimiser les conceptions des systèmes. Les modèles mathématiques permettent de prédire le transfert de chaleur dans des conditions différentes et de simuler les performances des systèmes en utilisant des paramètres clés tels que la taille des pores et la conductivité thermique. Ces modèles sont également utilisés pour concevoir des matériaux poreux et des systèmes d'échange de chaleur plus efficaces pour les applications industrielles.

Les transferts de chaleur dans les milieux poreux se réfèrent aux mécanismes de transfert de chaleur qui se produisent dans des matériaux qui contiennent des pores ou des vides à l'échelle microscopique. Ces milieux peuvent inclure des roches, des sols, des matériaux de filtration, des mousses, des éponges, des tissus biologiques, etc. Les transferts de chaleur peuvent se produire par

conduction, convection et rayonnement, et sont influencés par des facteurs tels que la porosité, la conductivité thermique, la viscosité du fluide, la température et la densité du milieu poreux. Les transferts de chaleur dans les milieux poreux ont des applications dans de nombreux domaines, tels que les géosciences, la production d'énergie et les procédés industriels.

2.3.2 Les types de transfert de chaleur dans les matériaux poreux :

Un matériau poreux est décrit comme un milieu constitué de plusieurs phases dont au moins une est fluide. Les cavités (vides) formées par les phases fluides sont appelées pores et la phase solide, la matrice. Entre ces différentes phases, règnent plusieurs échanges ou transfert de matière ou énergie. Le transfert thermique au sein de ces matériaux poreux se réalise selon trois « modes » se distinguant par les phénomènes physiques mis en jeu. Dans ce qui suit, on traitera les trois phénomènes fondamentaux de transfert pouvant se produire en matériaux poreux.

2.3.3 La conduction dans les milieux poreux:

Le transfert thermique conductif dans les matériaux poreux résulte de la transmission de proche en proche de la chaleur par contact entre molécules d'une même ou de différentes phases. Le flux thermique φ est donc proportionnel essentiellement au gradient de température local à travers la conductivité thermique λ de la phase considérée.

Du point de vue du transfert par conduction, la majorité des matériaux poreux sont considérés comme des matériaux homogènes. Une conductivité thermique effective λ_{eff} est étroitement liée aux conductivités thermiques des phases en présence et aux caractéristiques morphologiques de la structure poreuse : $\lambda_{eff} = f(\lambda_s, \lambda_g, \varepsilon \dots)$

Un régime thermique permanent, auquel correspond une densité de flux thermique uniforme s'établit quand un gradient de température uniforme est imposé à un milieu poreux dont l'espace des pores est monophasique immobile et non réactif. On peut définir la conductivité thermique effective λ_{eff} en utilisant une relation semblable à la loi de Fourier pour les milieux homogènes, soit:

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.7)$$

Dans les milieux poreux, la conductivité thermique λ dépend de la conductivité thermique des grains solides et de la conductivité thermique de l'air ou du

fluide dans les pores. Pour tenir compte de cette dépendance, la conductivité thermique peut être modélisée comme suit:

$$\lambda = \lambda_s + \phi(\lambda_f - \lambda_s) \quad (2.8)$$

où λ_s est la conductivité thermique des grains solides, λ_f est la conductivité thermique du fluide dans les pores, ϕ est la porosité du matériau et $(\lambda_f - \lambda_s)$ est le contraste de conductivité thermique. Dans cette section, nous basons notre investigation sur la méthode de transfert de chaleur la plus utilisée dans l'industrie : c'est le transport par conduction dans les matériaux poreux, que nous traitons à l'aide de la relation de Fourier.

La conduction thermique. Loi de Fourier: La conduction est un moyen de transfert d'énergie dû au mélange moléculaire par transfert de chaleur. Il se transmet dans les zones à basse température. Le facteur responsable de la conduction thermique est le gradient de température. La loi de Fourier exprime la densité de flux d'énergie conductrice mesurée en $[J m^{-2} s^{-1}$ ou $W m^{-2}]$ comme :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \vec{\nabla}(T) \quad (2.9)$$

Contrairement aux phénomènes de transport dans les liquides, la ligne simule toutes les phases présentes dans un milieu poreux : matrice solide, liquides et gaz pouvant remplir l'espace poreux. Sachant que chaque phase a sa propre conductivité. Le contexte comportemental s'applique notamment à la transmission d'énergie sous forme de chaleur ; liés à la conduction pure se produisant en milieu stationnaire et en l'absence de source d'énergie interne associée à une dissipation, des réactions chimiques ou un changement de phase, selon la relation suivante :

$$\frac{du}{dt} + \frac{di}{dt}\phi = C \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{di}{dt}\phi = 0$$

Au cœur de la conductivité et de la capacité calorifique volumétrique, $C [J m^{-3} K^{-1}]$ est une constante. La combinaison de de la loi de Fourier pour la densité de flux d'énergie conductrice et de de la relation précédente conduit à «l'équation de». Chaleur», qui détermine la variation de température espace-temps :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C} \text{div} \vec{\nabla} T = \alpha \Delta T \quad (2.10)$$

avec:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C}$$

(2.11)

où α est la diffusivité thermique qui s'exprime en $[m^2 s^{-1}]$. En régime stationnaire, l'équation de la chaleur se réduit à l'équation de Laplace, qui s'écrit:

$$\Delta T = 0 \quad (2.12)$$

ou:

$$\sum_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.13)$$

La conservation de l'énergie implique de plus ; d'une part une contrainte portant sur la densité de flux et d'autre part une interface entre deux phases ayant des conductivités différentes: la composante normale $n\phi$ indiquant la quantité d'énergie transférée à l'interface doit se conserver à sa traversée. Par conséquent, l'interface ne peut pas accumuler de l'énergie. Cette condition joue formellement un rôle important dans les phénomènes de conduction en milieu composite, et en milieu poreux en particulier.

2.3.4 La convection dans les milieux poreux:

Ce mode de transfert, résulte de la conductivité thermique et du transport d'énergie par le déplacement de particules poreuses (particules liquides). Le transfert de chaleur par convection ne se produit que dans les phases liquides et dérive de gradients thermiques locaux responsables des mouvements convectifs qui complètent le transport d'énergie thermique.

Il existe deux grandes catégories de transfert de chaleur par convection dans les milieux poreux :

la convection naturelle et la convection forcée. Entre ces deux situations extrêmes, se distingue la convection mixte, caractérisée par une proportion sensiblement égale des effets de la convection forcée et naturelle sur le transfert de chaleur.

L'étude de la convection thermique dans les milieux poreux est compliquée par le caractère essentiellement hétérogène de ces milieux.

Cependant, dans la plupart des matériaux poreux utilisés dans la construction, et en particulier les isolants thermiques, la taille des pores est si petite que le transfert de chaleur convectif est négligeable.

2.3.5 Le rayonnement dans les milieux poreux:

Le transfert de chaleur par rayonnement résulte de la propagation du rayonnement thermique émis aux limites du matériau poreux à l'intérieur du matériau lui-même. Le transfert de chaleur par rayonnement est important à haute température. De plus, la propagation de ce rayonnement est fortement réduite par la matrice solide faisant office de bouclier, de sorte que la contribution du rayonnement au transfert de chaleur dans les matériaux à faible ou moyenne porosité ($\varphi \leq 0.9$) reste généralement négligeable. La propagation du rayonnement thermique est déterminée par l'équation de pénétration du rayonnement « ETR », qui décrit la distribution directionnelle et spatiale de l'intensité $I(z, \mu)$ et qui s'écrit en (1D) :

$$\mu \left(\frac{\delta I(z, \mu)}{\delta z} \right) = -\beta_\lambda I_\lambda(z, \mu) + K_\lambda I_\lambda^0(T) + \frac{\sigma_\lambda}{2} \int_{-1}^1 \varphi_\lambda(\mu' \rightarrow \mu) d\mu' \quad (2.14)$$

avec

$\beta_\lambda, K_\lambda, \sigma_\lambda$ et $\varphi_\lambda(\mu \rightarrow \mu')$ sont les propriétés radiatives équivalentes du matériau poreux déterminées pour chaque longueur d'onde du spectre. L'équation de transmission radiative prend en compte les phénomènes de diffusion, d'absorption et d'émission de rayonnement par un milieu.

$$\phi_r = \int_0^\infty \left(\int_{-1}^1 I_\lambda(z, \mu) \mu d\mu \right) d\lambda \quad (2.15)$$

En comparant les trois modes de transmission dans un milieu poreux, on constate que le rayonnement est le mode le moins étudié. Cependant, à mesure que se développent de nouveaux matériaux : céramiques, fibres, frites, et que les plages de température de ces matériaux s'élargissent, on assiste à une augmentation de l'activité de recherche dans ce domaine. À titre d'exemple, citons l'étude du rayonnement dans des isolants poreux translucides très poreux, qui a fait l'objet de plusieurs études ces dernières années. L'équilibre thermique d'un matériau poreux soumis à ces trois modes de transfert de chaleur est régi par l'équation énergétique :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(\vec{\phi}_t) = -\nabla(\vec{\phi}_c + \vec{\phi}_{conv} + \vec{\phi}_r) \quad (2.16)$$

Cependant, pour simplifier la comparaison de différents matériaux, les scientifiques de l'isolation utilisent souvent une propriété k_{eq} ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$),

appelée "conductivité thermique équivalente" qui génère des contributions de différents modes de transmission selon cette relation:

$$k_{eq} = \frac{\phi_c + \phi_r + \phi_{conv}}{\Delta T} \cdot L \quad (2.17)$$

2.4 l'étude chronologique des types transfert thermique :

2.4.1 Etude de la conduction :

Introduction:

Comme nous l'avons déjà défini, la conduction est un mode de transmission qui se produit dans les milieux poreux et particulièrement dans les structures solides. Ainsi, le illustre maintenant une partie du travail important que a été effectué au cours des dernières années. Nous nous intéressons aux années 1998 à 2012.

Divers ouvrages répertoriés:

*La conductivité thermique est déterminée en minimisant la différence entre le modèle et la mesure de résistance. Les détails de cette technique sont donnés dans les articles **d'Asheghi et son équipe (1998, 2006)**. Par la suite, **Mazumdar et Majumdar (2001)**, **Chen et al. (2005)** ont déterminé la conductivité thermique de longs nanofils de silicium de même taille que dans l'expérience de **Li et al** . Méthode de Monte Carlo basée sur l'algorithme du régime de transition Par ailleurs, **Joseph HENON (2012)** a reconnu que la conductivité thermique dépend des conductivités respectives des phases solide et gazeuse dans le matériau poreux . L'étude de cette propriété nécessite de comprendre les transferts de chaleur dans le solide , mais aussi l'influence de l'organisation spatiale de la porosité. Autrement dit ; La conductivité thermique du matériau poreux 907 dépend de la composition de son renfort massif et de sa porosité 907. Des paramètres importants sont la taille des pores, leur forme, mais aussi les proportions et l'organisation du réseau poreux. A température ambiante et pour les pores inférieurs à 4 mm, la conduction représente la majeure partie du transfert de chaleur.*

Conclusion:

De cette humble analyse nous concluons que les premières études de conductivité thermique dans les matériaux poreux s'appuient sur les tech-

riques et dispositifs expérimentaux permettant de mesurer. Au fil des ans et avec les progrès de la recherche ; Cette recherche adopte une approche nouvelle qu'il s'agit de trouver les facteurs qui influencent la valeur de la conductivité thermique.

2.4.2 Rayonnement:

Introduction:

Comme nous l'avons défini, le rayonnement est un mode de transfert de chaleur qui se produit dans les milieux poreux, en particulier dans les structures solides. Nous montrons quelques œuvres importantes qui ont été créées entre 1960 et 2008 dans l'ordre chronologique.

Divers ouvrages répertoriés:

La théorie de transport du flux lumineux [29] s'avère être un outil très efficace lorsqu'il s'agit de modéliser l'interaction de la lumière avec un milieu diffusant. Cette méthode permet de définir l'équation de transition radiative (ETR), qui exprime l'équilibre des flux lumineux se propageant à l'intérieur du volume élémentaire du milieu diffusant. L'équation de transfert radiatif a été développée pour la première fois par **Chandrasekhar en 1960** pour décrire la propagation du rayonnement dans les milieux interstellaires et la propagation des neutrons dans les réacteurs (**S. Chandrasekhar, 1960**). Ainsi, selon **Hervé Thierry KAMDÉ TAGNE (2008)**, le problème de rayonnement dans les milieux poreux translucides est décrit par l'équation de transfert de rayonnement. Cette équation explique la relation entre différents phénomènes : émission d'un milieu, absorption et diffusion d'un rayonnement en tout point de son trajet dans un milieu translucide. La définition de l'équation de transfert radiatif en milieu isotrope est décrite dans de nombreux articles : **Chandrasekhar (1960)**, **Ozisik (1973)**, **Siegel et Howell (2002)** et **Modest (2003)**.

Les principaux schémas de transfert de chaleur radiante [30] dans milieux poreux sont mentionnés par **Tong et Tien en 1980**, suivis par **Baillis et Sacadura en 2000**.

En 2002, **Zhang et co-auteurs** ont conclu que la complexité de l'équation de transfert radiatif pour les structures solides est augmentée car les propriétés radiatives de ces milieux dépendent de la direction de propagation radiative. Après 9 ans et au fur et à mesure de l'avancement des recherches ; **Miloud Chahlafi (2011)** a abordé le sujet dans son mémoire de maîtrise, qui vise à proposer un modèle de rayonnement thermique dans un réacteur

nucléaire lors d'un accident grave entraînant la dégradation de crayons combustibles. Cette configuration géométrique crée un milieu poreux complexe où la température peut dépasser 2000K. Dans ces conditions, le rayonnement thermique est le mode de transmission dominant dans le milieu et il est nécessaire de le modéliser pour estimer les températures, en simulant tous les phénomènes physiques liés, qui dépendent tous de la température. La conductivité radiative est calculée par la méthode des perturbations appliquée à l'équation de transfert radiatif publiée en 2008 par **A.V. Gusarov** après l'application de développement d'une méthode analogue à l'ETR.

Conclusion:

De ces analyses, nous avons conclu que la plupart des études sur la méthode de transfert de chaleur radiatif sont basées sur les propriétés radiatives des milieux poreux, qui dépendent de la direction de propagation du rayonnement et de problème radiatif dans les milieu poreux décrit par l'équation de transfert radiatif Grâce à des années de recherche et d'étude ; l'équation de transfert radiatif a finalement atteint une résolution en développant une méthode analogue à la méthode ETR.

2.4.3 Convection:

Introduction:

La majorité des recherches sur la convection naturelle ou mixte dans les milieux poreux en général se sont concentrées sur des problèmes géologiques et ont concerné des couches poreuses horizontales à gradients thermiques verticaux. L'isolation thermique de parois horizontales-verticales avec des matériaux hautement poreux n'a donné lieu qu'à investigations expérimentales préalable dont les résultats ne peuvent pas être généralisés.

Divers ouvrages répertoriés:

La convection thermosolutrale (ou double diffusion) a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs ces dernières années en raison de l'intérêt pour la résolution de problèmes dans divers domaines de l'industrie et du milieu naturel. La première étude a porté sur couches poreuses exposées à des gradients verticaux de température et de concentration. Plus récemment, cependant, les couches poreuses avec des températures et des concentrations contraintes sur les bords verticaux ont suscité un intérêt particulier.

Une part importante des recherches sur les films poreux concerne les films

isotropes et les films anisotropes.

Le premier à avoir traité de la double convection diffusives dans un milieu poreux a été **Nield (1968)**, qui a étudié la stabilité d'une couche poreuse horizontale chauffée et salée par le bas. À l'aide d'une analyse de stabilité linéaire, il a déterminé les valeurs de nombres de Rayleigh critiques qui caractérisent le début de la convection établie pour conditions aux limites différentes.

Après, **Khair et Bejan (1985)** ont étudié le phénomène de la convection thermosolutale qui se manifeste au voisinage d'une plaque verticale plongée dans un milieu poreux saturé par un fluide. Une analyse d'échelle a permis d'identifier quatre régimes possibles de convection selon les valeurs des forces de volume N et le nombre de Lewis Le .

Par la suite, en utilisant une méthode numérique, **Trevisan et Bejan (1985)** ont également étudié la convection à double diffusion dans une cavité poreuse carrée avec parois verticales maintenues à des températures et concentrations constantes et parois adiabatiques horizontales et imperméables. L'analyse d'échelle a été utilisée pour résoudre ce problème dans les cas extrêmes d'écoulements entraînés par des effets thermiques ou de masse et pour identifier différents effets ayant une incidence sur les performances globales de transfert de chaleur et de masse. Les résultats de cette analyse concordent avec les calculs numériques.

Un an plus tard, **Poulikakos (1986)** présente un article sur l'analyse de la stabilité linéaire dans une couche poreuse horizontale à double diffusion. Les paramètres critiques du problème sont déterminés et les frontières définissant les régions des régimes de convection sont déterminées.

Conclusion:

Après avoir fait cette petite analyse sur ce transfert thermique, on constate que la convection a plusieurs types : la convection naturelle, mixte et à double diffusion. Et chaque étude a été menée dans un modèle bien défini en raison de l'étendu du sens global de la convection, afin de faire une image claire sur chaque type de convection et ensuite mieux comprendre ce phénomène conducteur en général.

2.5 Conclusion:

En effet, la compréhension des différents modes de transfert de chaleur est essentielle dans de nombreuses applications industrielles et quotidiennes. Il est important de connaître les principes de la conduction, de la convection et du rayonnement pour concevoir et optimiser les systèmes de chauffage et de refroidissement, ainsi que pour résoudre les problèmes liés à la chaleur dans diverses applications.

En conclusion, les différents modes de transfert thermique, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement, sont tous présents dans les matériaux homogènes en général, ainsi que dans les matériaux poreux en particulier.

En conclusion, les modes de transfert thermique, tels que la conduction, la convection et le rayonnement, sont présents dans les matériaux homogènes et poreux. Cependant, la présence de pores dans les matériaux poreux peut modifier significativement les caractéristiques et l'efficacité de ces modes de transfert thermique. Comprendre et modéliser ces transferts thermiques dans les matériaux poreux est essentiel pour optimiser leur utilisation dans diverses applications, notamment l'isolation thermique, la filtration, la catalyse et le stockage de chaleur.

Chapitre 3

Simulation de transfert thermique dans les milieux poreux :

3.1 Introduction:

L'équation de diffusion convective dans un milieu isotrope comprend des coefficients qui caractérisent les propriétés d'un milieu poreux (porosité, perméabilité, viscosité, gradient de pression) par diffusivité thermique. Pour voir l'influence de ces facteurs sur le phénomène de transfert de chaleur, nous avons commencé par résoudre l'équation de la chaleur dans un milieu poreux.

Nous avons choisi la méthode des différences finies pour résoudre l'équation. Nous allons présenter deux schémas de discrétisation, implicite et explicite.

A partir des résultats obtenus, nous allons voir l'effet de la porosité et de la viscosité sur la solution. Nous discuterons les résultats à la fin du chapitre.

3.2 Formulation du problème :

Pour simplifier, considérons un transfert de chaleur unidirectionnel par conduction selon x dans un matériau poreux comme le montre la figure 3.0. Nous supposons que les propriétés thermiques du matériau ne dépendent pas de la température. Nous extrayons l'élément de largeur dx et équilibrons les flux entrants et sortants de cet élément. Notons que:

S la section du canal d'écoulement.

V le volume entre x et $x + dx$.

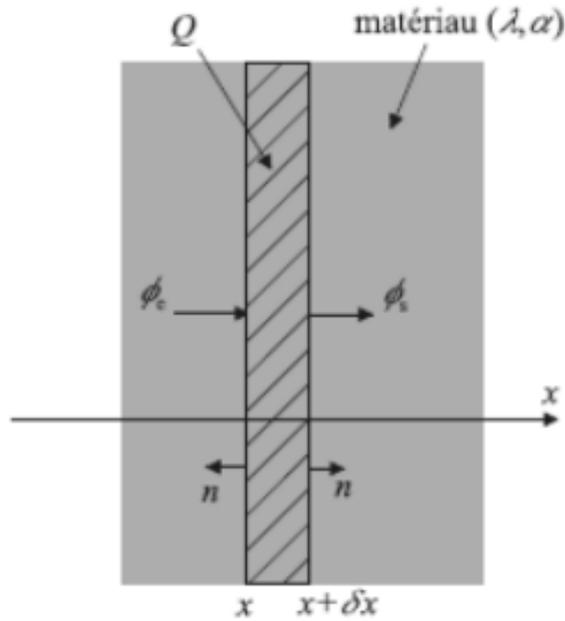


Figure 3.1 : Bilan thermique sur un transfert 1D par conduction

Le flux entrant s'écrit :

$$\varphi_e = -\lambda S \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (3.1)$$

De la même façon le flux sortant s'écrit :

$$\varphi_s = -\lambda S \frac{\partial T(x + dx, t)}{\partial x} \quad (3.2)$$

Le bilan thermique consiste donc à écrire que la somme des flux, comptés positivement le flux entrant dans le volume élémentaire, est égale au terme d'accumulation de chaleur. Si en plus on considère qu'il y a une source de chaleur interne Q dans le matériau considéré, nous aurons :

$$\varphi_e - \varphi_s + Q = \rho V C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

En remplaçant les flux par leur expression on trouve alors :

$$-\lambda S \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} + \lambda S \frac{\partial T(x + dx, t)}{\partial x} + Q = \rho V C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

Sachant que, par définition, la dérivée de la fonction f est :

$$\lim_{dx \rightarrow 0} \frac{f(x + dx) - f(x)}{dx} = \frac{df(x)}{dx} \quad (3.5)$$

On aboutit donc à :

$$\lambda S dx \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + Q = \rho V C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

On trouve finalement :

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{Q}{V} = \rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3.7)$$

Qui s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{Q}{\rho C_p V} \quad (3.8)$$

Cette équation représente l'équation de diffusion de la chaleur monodimensionnelle. On pose :

$$D = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (3.9)$$

qui représente la diffusivité thermique La conductivité thermique étant celle de la structure solide du milieu poreux.

$$q = \frac{Q}{\rho C_p V} \quad (3.10)$$

L'équation s'écrit finalement :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = q \quad (3.11)$$

Cette équation est une équation aux dérivées partielles du second ordre dans l'espace et une équation hyperbolique de type . Pour clarifier mathématiquement le problème, il est généralement nécessaire d'ajouter à cette équation, dite équation de diffusion de la chaleur ou simplement équation de la chaleur, une condition initiale et des conditions aux limites aux bords de la zone d'étude. Ces conditions peuvent être superposées à la température. Dans ce cas, nous parlons de termes de Dirichlet. Nous écrivons:

$$T(0, t) = T_0(t), \quad T(L, t) = T_L(t) \quad (3.12)$$

Si nous superposons les flux de chaleur entrant et sortant, nous obtenons les termes de Neumann. Dans ce cas, les conditions seront fixées par:

$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \varphi_0(t), \quad \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = \varphi_L(t) \quad (3.13)$$

En plus de ces conditions aux limites spatiales, il existe une condition initiale qui définit la distribution de température à $t = 0$. Cette condition s'écrit généralement :

$$T(x, 0) = T_{ini}(x) \quad (3.14)$$

3.3 Méthode de résolution numérique :

Afin de résoudre numériquement l'équation de la chaleur, l'équation aux dérivées partielles sous-jacente à ce problème doit d'abord être discrétisée. Pour cela il faut choisir une méthode de discrétisation. Dans notre cas, nous avons choisi la méthode des différences finies en raison de sa simplicité et de son efficacité. Il existe essentiellement trois schémas de discrétisation aux différences finies [31]

Schéma d'Euler explicite :

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} - D \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2} = q \quad (3.15)$$

Schéma d'Euler implicite :

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} - D \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} = q \quad (3.16)$$

Schéma de Crank-Nicholson : Ce schéma représente la moyenne de la somme de (3.16) + (3.15)

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} - D \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2} - D \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} = q \quad (3.17)$$

Il est clair que, quel que soit le schéma choisi, parmi ces trois schémas il faut choisir un pas spatial de Δx , noté h , et nous essayons de trouver les valeurs de notre solution $T(x, t)$ aux points d'abscisse $x = 0, h, 2h, \dots$. Nous devons également être limités à un ensemble discret de fois si nous voulons calculer ces valeurs, nous fixons donc un pas de temps de k et visons à trouver la valeur de $T(x, t)$ aux instants $t = k, 2k, 3k, \dots$. Dans la séquence, nous écrivons $T_{ij} = T(ih, jk)$ la valeur (approximative) calculée de la solution $T(x, t)$ au temps jk ($j \geq 0$) et au point d'abscisse ih .

La discrétisation de l'équation consiste à transformer de ses termes en expressions ne contenant que nos valeurs T_{ij} (la valeur de T correspond aux coordonnées i et j).

3.4 Résultats et Discussion :

Nous avons résolu l'équation de la chaleur dans le cas unidirectionnel et la solution obtenue dépend de la diffusivité thermique et des conditions initiale et aux bords. Dans cette étude, nous avons résolu l'équation de la diffusion pour une valeur de diffusivité égale à 7.5×10^{16} et $D = 10^{10}$ et une viscosité $\mu = 10$ et pour différentes conditions aux bords (conditions de Dirichlet) Nous avons tracé l'évolution de la température dans le matériau en fonction de la position, En variant le nombre d'itérations de 10 jusqu'à 100 en prenant le temps pour chaque expérience . Les résultats sont illustrés sur les figures 3.1; 3.2 ; 3.3 et 3.4 ci-dessous. Et voici le tableau représentant la temps pris par le programme pour chaque nombre d'itérations: Ensuite, en augmentant juste la valeur de coefficient de diffusivité jusqu'à 10^{-9} et refaire les mêmes itération en gardant les autres paramètres avec leurs valeurs initiales en aura les figure 3.5 ,3.6 , 3.7 et 3.8 comme résultats: En augmentant encore plus la valeur de coefficient du diffusion jusqu'à 10^{-8} on aura les figure 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12 comme suit : Maintenant on revenons a nos valeur initiales des paramètres c'est-à-dire $D = 10^{-10}$ et la perméabilité aussi égale toujours a 7.5×10^{-16} et on diminue la viscosité à une valeur qui égale à 5 on aura les figure suivants 3;13 , 3.14 , 3.15 et 3.16 comme suit : On consultant le tableau suivant on arrive à distingué une petite différence pour le temps de diffusion :

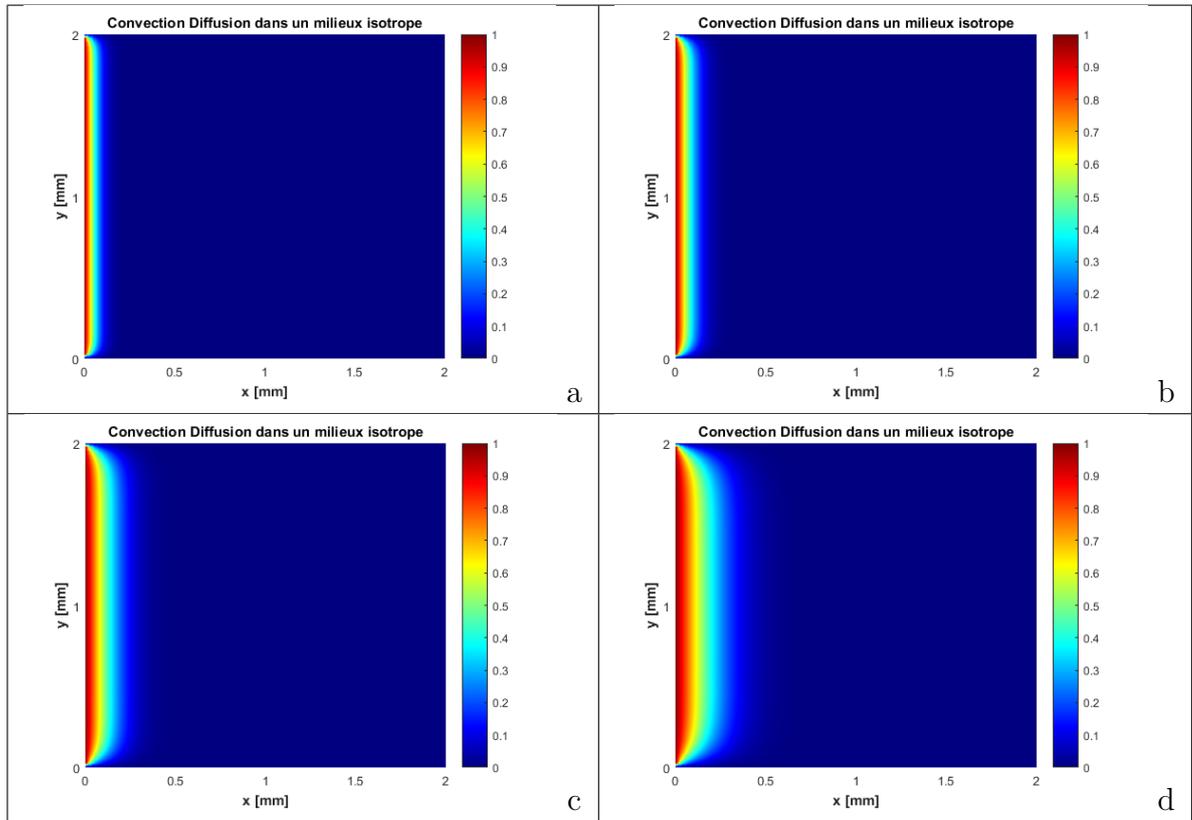


Table 3.1 :

- (a)- Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (d)- Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

Itération	temps (s)
10	10.75
20	22.19
50	55.92
100	106.19

Table 3.2

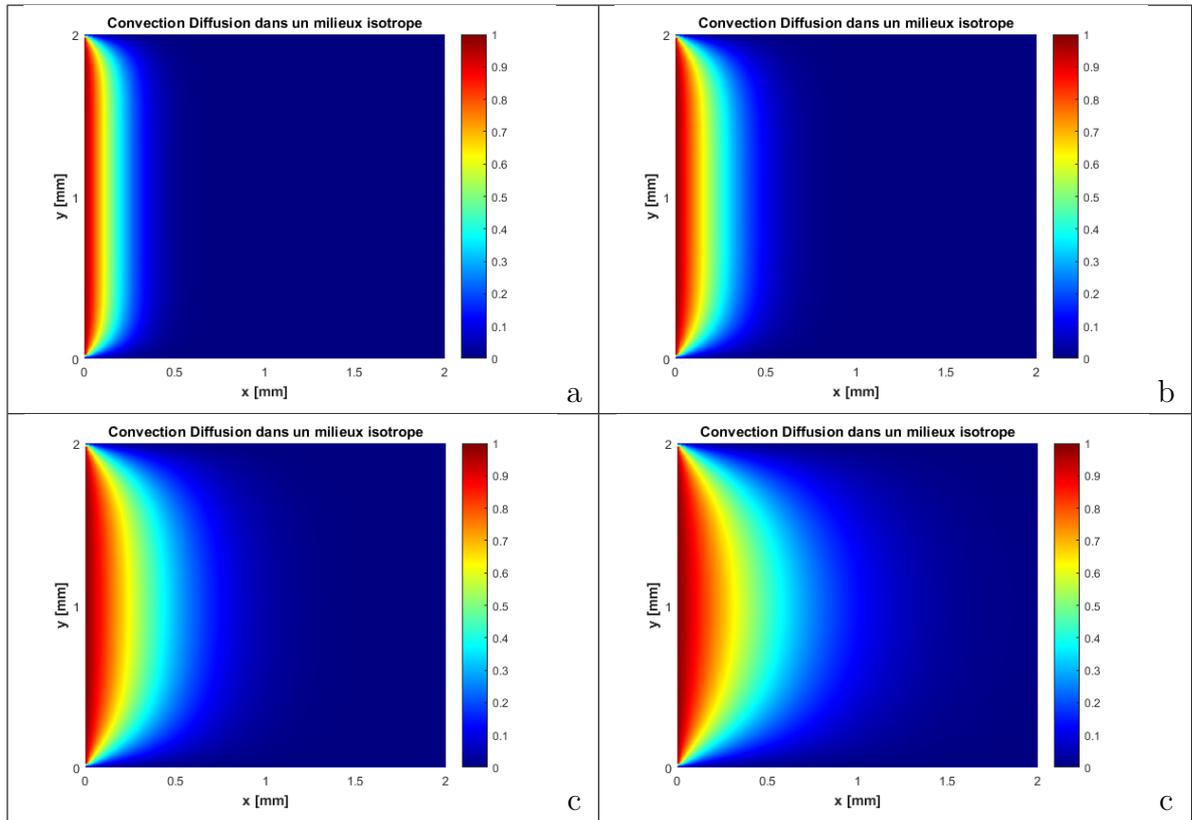


Table 3.3 :

- (a)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (d)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

Itérations	temps (s)
10	10.65
20	21.21
50	53.38
100	105.06

Table 3.4

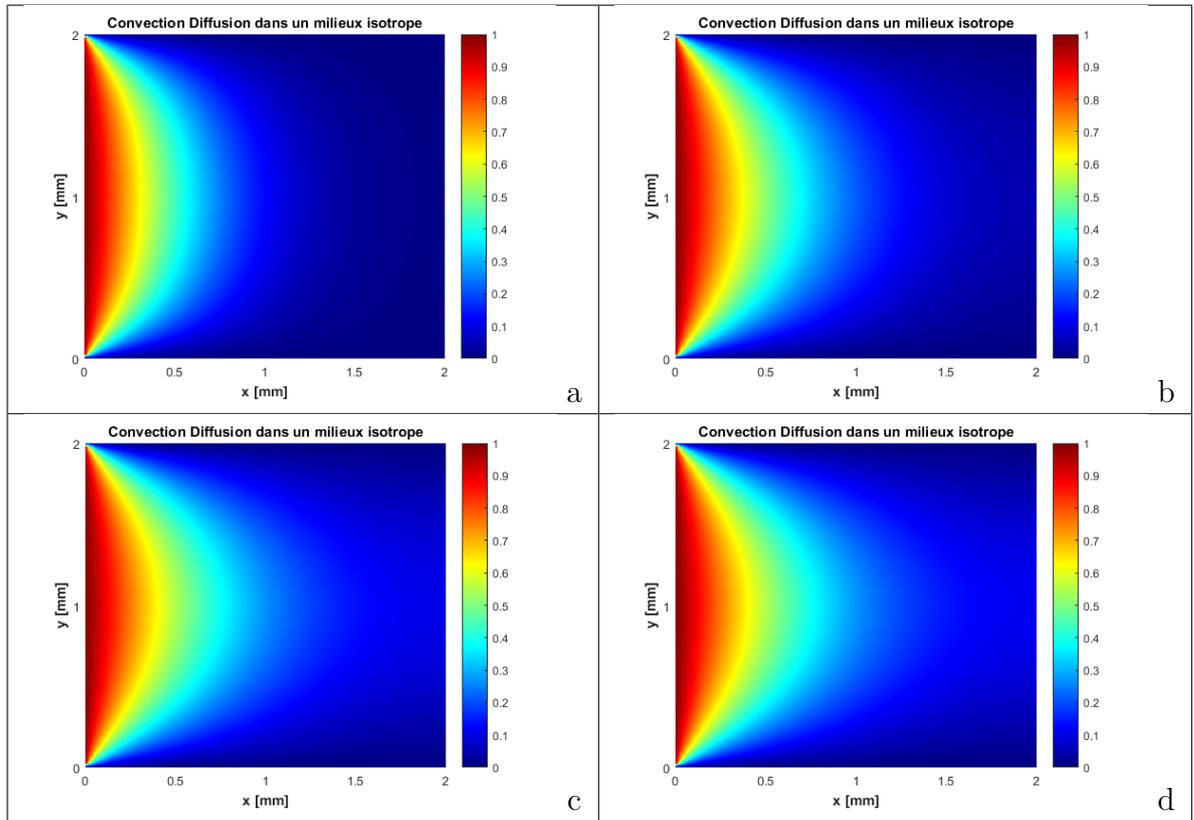


Table 3.5 :

(a)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$

(c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(d)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 10$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

Itérations	temps (s)
10	10.54
20	21.34
50	53.34
100	106.3

Table 3.6

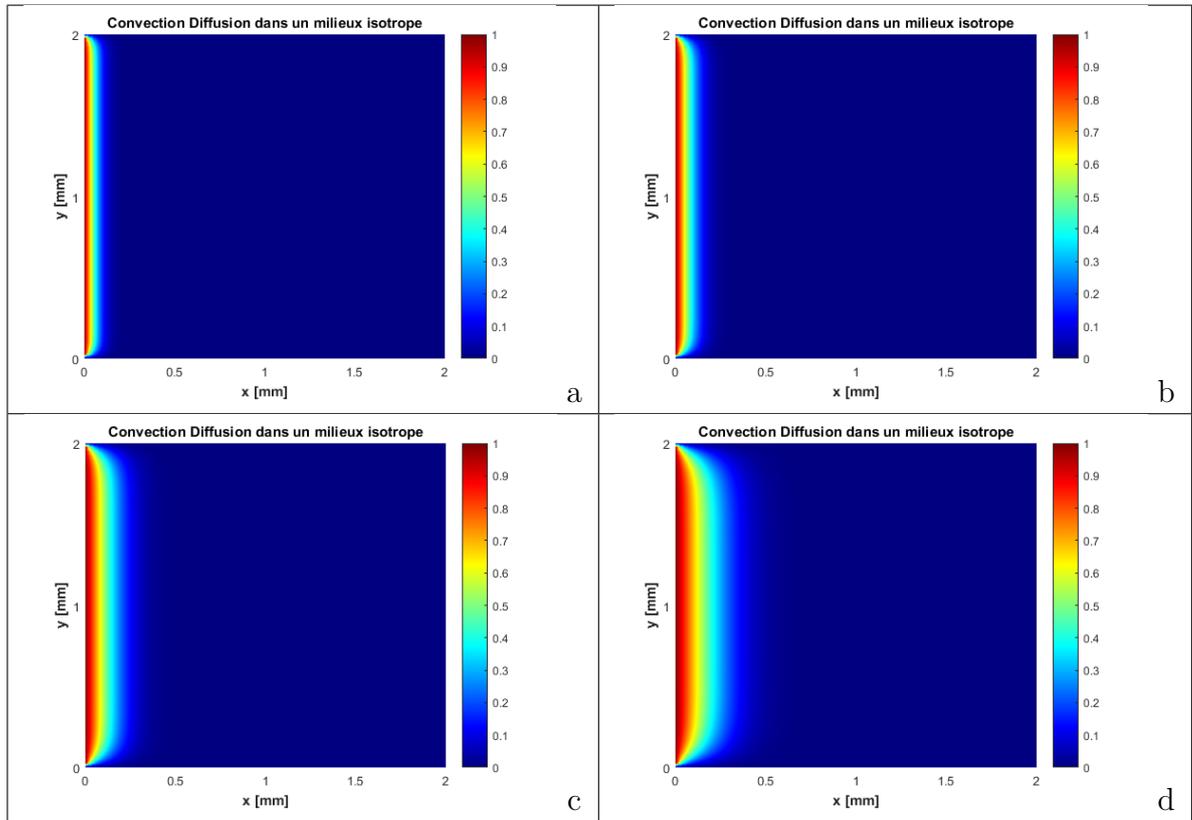


Table 3.7 :

- (a)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.
- (d)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

On continue toujours avec la même viscosité $\mu = 5$ et diffusion 7.5×10^{-16} mais cette fois ci en refait les mêmes étapes des premières expériences (on augmente le coefficient de diffusion à 10^{-9} puis 10^{-8}) on aura les figures 3.17;3.18;3.19;3.20;3.21;3.22;3.23 et 3.24 et on observe les périodes des expériences dans les tableau (3,5, 3.6) on arrive à voir la différence de temps et c'est la seule influence de la viscosité sur les diffusion thermique. Dans cette dernière étape, on laisse les paramètres comme ils sont initialement $\mu = 10$

Itérations	temps (s)
10	10.68
20	21.52
50	53.53
100	108.08

Table 3.8

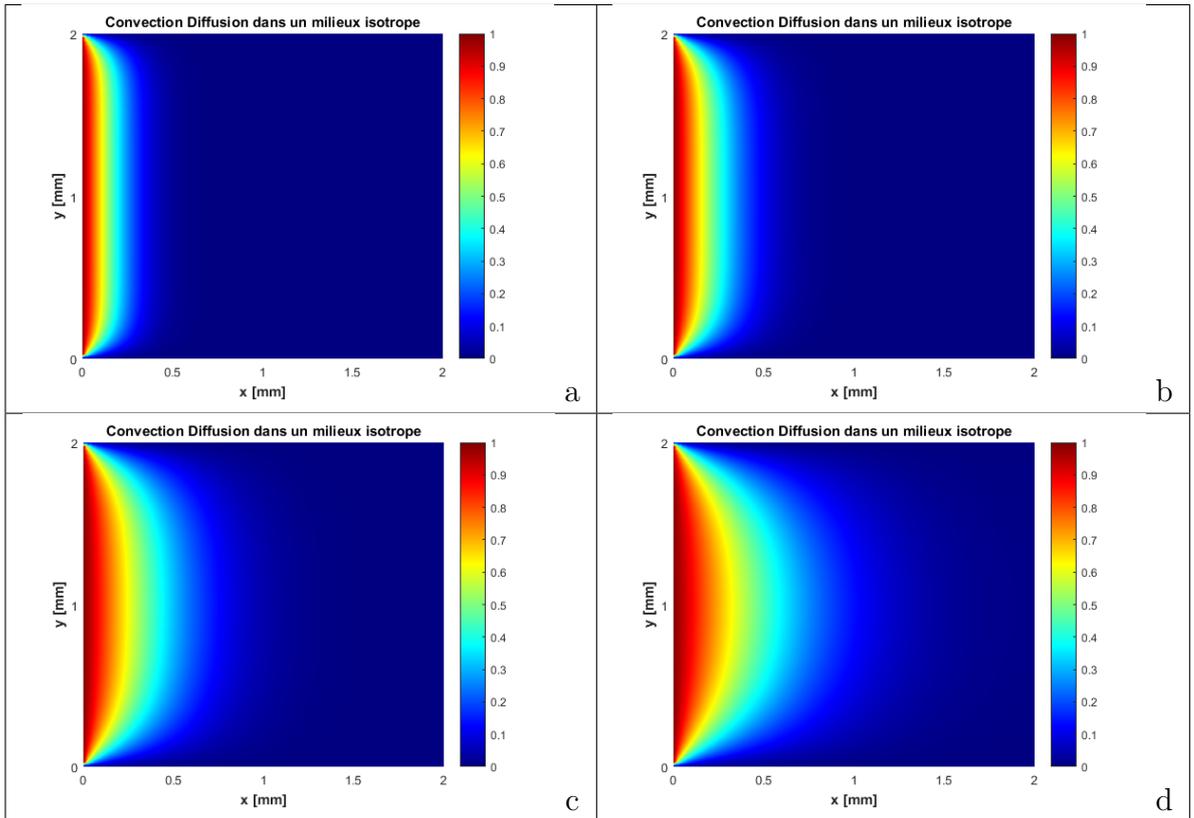


Table 3.9 :

(a)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(d)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-9}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

Itérations	temps (s)
10	10.78
20	21.4
50	53.59
100	108.33

Table 3.10

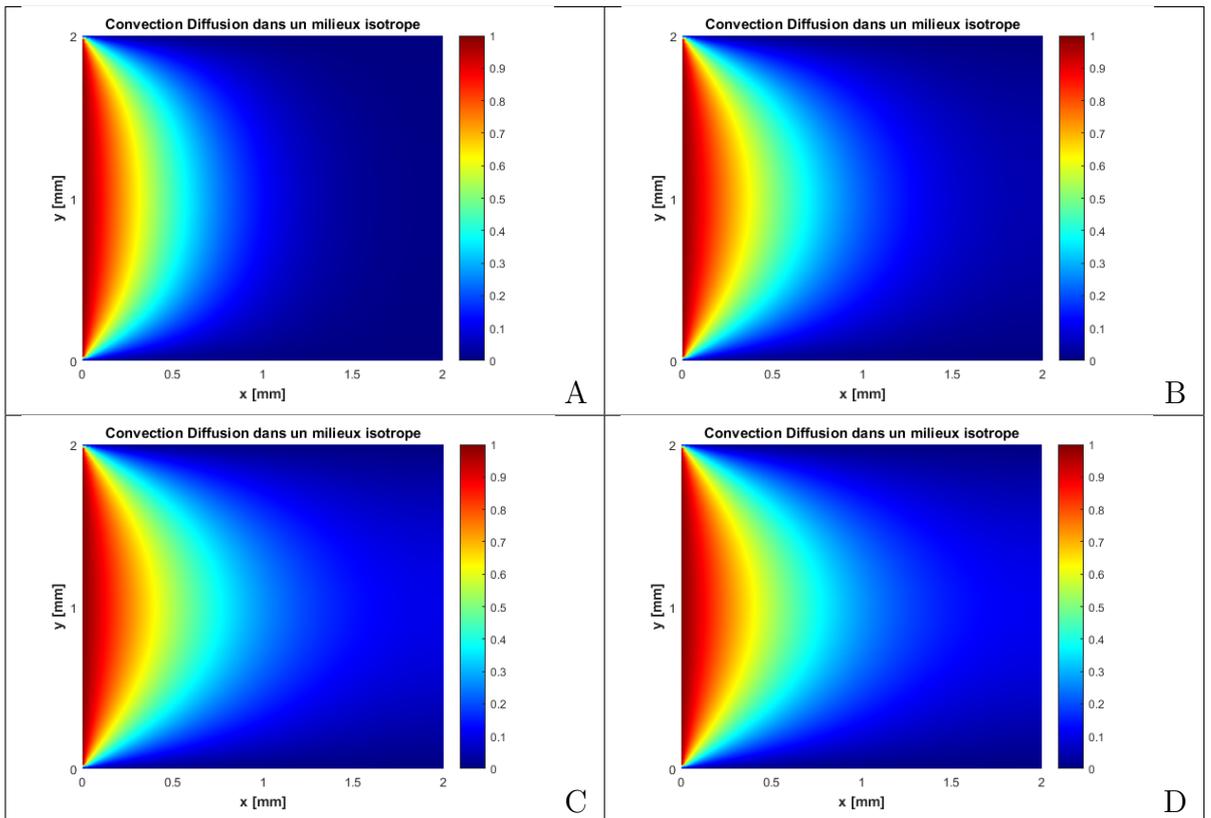


Table 3.11 :

(A)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(B)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(C)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

(D)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-8}$ et $\mu = 5$ et $K=7.5 \times 10^{-16}$.

Itérations	temps (s)
10	10.73
20	21.76
50	53.82
100	107.68

Table 3.12

et $D = 10^{-10}$ mais on augmente deux fois la valeur de la perméabilité une fois à 7.5×10^{-14} et une deuxième fois à 7.5×10^{-13} et on observe les figure ci-dessus (3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32) et leurs tableau de périodes (tableau 3.7, 3.8) comme suit

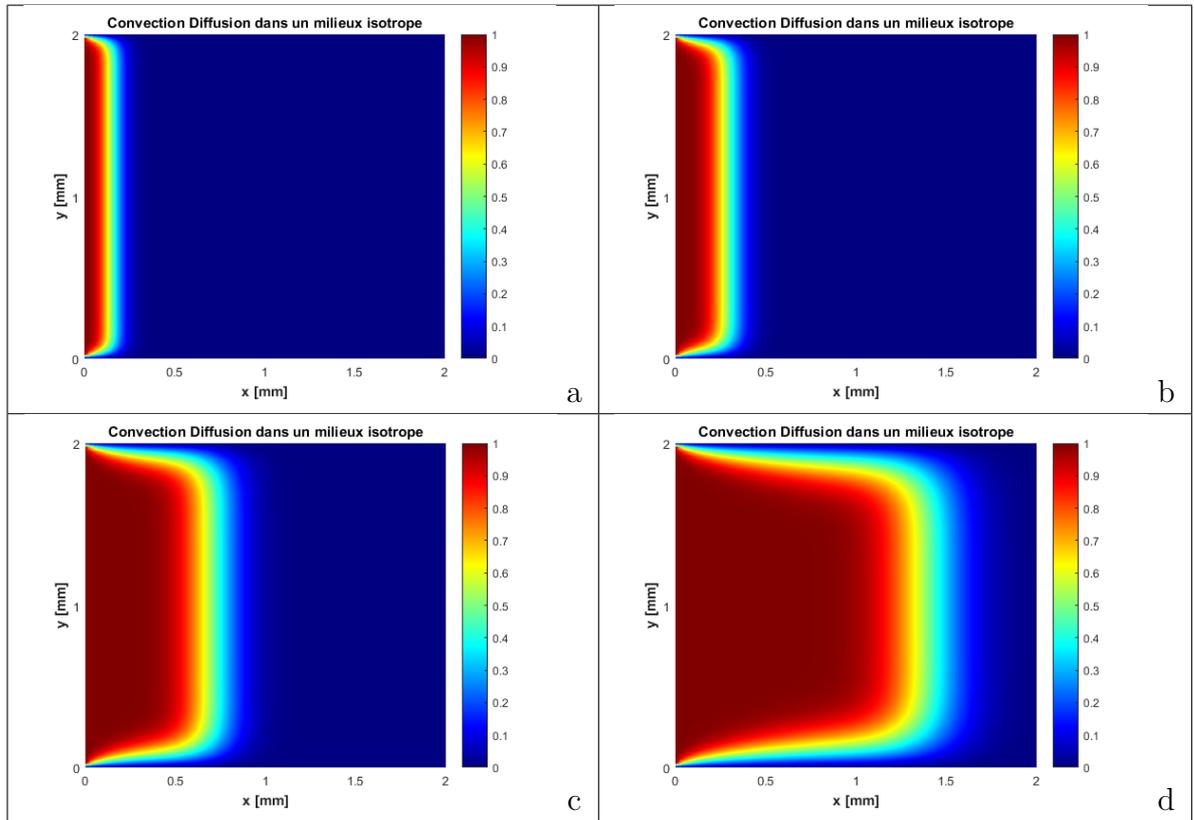


Table 3.13 :

- (a)-Diffusion de température en fonction de la position pour 10 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=10^{-13}$.
- (b)-Diffusion de température en fonction de la position pour 20 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=10^{-13}$.
- (c)-Diffusion de température en fonction de la position pour 50 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=10^{-13}$.
- (d)-Diffusion de température en fonction de la position pour 100 itérations à $D = 10^{-10}$ et $\mu = 10$ et $K=10^{-14}$.

Itérations	temps (s)
10	10.81
20	21.33
50	53.05
100	107.23

Table 3.14

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons analysé numériquement l'équation de diffusion de la chaleur dans les milieux poreux. Nous avons étudié l'influence de la porosité moyenne à travers la diffusivité thermique du matériau testé. Nous avons trouvé que ce paramètre joue un rôle important dans le transfert de conductivité. En effet, plus la diffusivité et donc la porosité sont élevées, meilleure est la diffusion. Par contre, on arrive à la conclusion que les conditions aux limites n'ont pas d'influence sur la transmission dans le milieu poreux.

Conclusion générale

Dans ce mémoire de master, nous nous sommes intéressées aux contributions à l'étude des modes de transfert thermique dans milieux poreux .

Dans un premier temps (chapitre 1), on arrive à conclure que les milieux poreux sont des matériaux contenant des pores (vides) de différentes tailles et formes, interconnectés pour former un réseau complexe. Ils sont présents dans divers domaines scientifiques et d'ingénierie. Les milieux poreux sont étudiés pour comprendre des phénomènes tels que le transport de chaleur et de masse, la filtration, la séparation et la capacité de stockage. Leur perméabilité, qui dépend de la taille, de la connectivité des pores et de la nature du matériau, est une caractéristique clé. Ils sont utilisés dans des applications pratiques. La modélisation des milieux poreux est un domaine de recherche actif qui permet de prédire et de comprendre leur comportement grâce à des modèles mathématiques et des simulations numériques. On peut dire enfin que les milieux poreux sont omniprésents et présentent un grand intérêt pour diverses applications. La compréhension et la modélisation sont essentielles pour optimiser leur utilisation et développer de nouvelles technologies.

Au deuxième chapitre, nous avons analysé les différents modes de transferts thermique (Conduction, Convection, Rayonnement) qui s'y effectuent dans les matériaux homogènes en général et dans les matériaux poreux en particulier, en conclusion, les modes de transfert thermique, tels que la conduction, la convection et le rayonnement, sont présents dans les matériaux homogènes et poreux. Cependant, la présence de pores dans les matériaux poreux peut modifier significativement les caractéristiques et l'efficacité de ces modes de transfert thermique. Comprendre et modéliser ces transferts thermiques dans les matériaux poreux est essentiel pour optimiser leur utilisation

dans diverses applications, notamment l'isolation thermique, la filtration, la catalyse et le stockage de chaleur.

Au dernier chapitre, nous avons discuté du modèle numérique de transfert de chaleur. Après , nous avons résolu l'équation de diffusion de la chaleur (équation de conductivité) dans le milieu poreux . Nous nous intéressons à l'évolution de la chaleur (solution) pour différents milieux poreux en modifiant le coefficient de conductivité thermique, qui varie selon le milieu poreux. Nous avons également étudié la solution de l'équation de la chaleur pour différentes conditions aux limites. Nous avons observé que ces conditions aux limites n'affectent pas la transmission dans le milieu poreux.

bibliographie :

- [1] Kaci.Fodil (2012), *Simulation d'un déplacement immiscible eau-huile en milieu poreux*, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [2] Franck Lomine (2007), *Écoulements de particules dans un milieu poreux*, Université Rennes 1.
- [3] Danquigny Charles (2003), *Étude expérimentale transfert de masse en milieu poreux hétérogène*, Thèse de Doctorat Université de Luis Pasteur Strasbourg.
- [4] Fatah Mejni (2008), *structure synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux*, Lille.
- [5] Marsily.G (1986), *Quantity hydrogeology groud water hydrology for engineers*, Acadymic Aress, San Diego.
- [6] Bear.J (1972), *dynamics of fluids in porous media*, Dover publications, Inc., Nez-York.
- [7] Sanchez.P(1980), *non homogeneous media and vibration theory, lecture notes in physics, 127, .*
- [8] Olivier.B(2005), *Influence de cristaux d'hydrates de gaz ou de glace sur la perméabilité d'un milieu poreux*, thèse de doctorat, Saint-Etienne.
- [9] Guy.Barre(2007), *Introduction la simulation numérique des gisements pétroliers, .*
- [10] Alexander Dellache(2005), *Étude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux : comparaisons avec l'expérience*, Lille.
- [11] Nassir Khalifa(2009), *Étude expérimentale et numérique de la migration de polluants non miscibles dans un milieu poreux sature à l'échelle de darcy*, thèse de doctorat, Université Strasbourg.
- [12] Hassane D(2006) *Simulation numérique de déplacements polyphasiques en milieux poreux hétérogènes*, Magister, , Tizi-Ouzou.
- [13] Vincent Kretz(2002) , *Intégration de données de déplacements de fluides dans la caractérisation de milieu poreux hétérogènes, .*
- [14] C M. Marle (2006), *Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieux poreux,*, Université pierre et Marie-Curie.
- [15] Hussein Hoteit (2002) , *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, Université de Rennes1.

- [16] Cédric Belleil (2005), *Calcul direct des performances aérodynamique et acoustique d'un silencieux industriel par modélisation CFD, et optimisation aérodynamique*, Maitrise, Montréal.
- [17] A. Foulcault, J.F.Raoult(2005), *Dictionnaire de Géologie*, 6e édition Éd. Masson, .
- [18]Abelin,H .,L. Birgersson,(1991), *A Large-Scale Flow and Tracer Experiment in Granite .1. Experimental-Design and Flow Distribution*.
- [19] devriendt A. B.(1982), *La transmission de chaleur: Volume I, Tomes 1 et 2*, Gaëtan Morin.
- [20] Gourdin A . Boumahrat M(1991) , *Méthodes Numériques Appliquées*,OPU ALGER .
- [21] Kreith F(1967)*Transmission de la chaleur et thermodynamique* ,Masson paris.
- [22] E. B. B. Watson and D. V. Evans (1991), *Resonant frequencies of a fluid container with internal bodies*, *J. Engng. Math.* Vol. 25 : pp 115–135.
- [23] jannot Y (2012), *transfert thermique*,Nancy: École des Mince .
- [24] H. Fares (2011), *Étude et simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités fermées* , *Master académique en génie mécanique option énergétique*,Université Mouloud Mammeri, *Faculté de génie de la construction*, Département de génie mécanique, Tizi-Ouzou.
- [25] Adrien Verschaere (2016), *Les 3 modes de transfert thermique* , .
- [26] Abdelkader MOJTABI, Marc PRAT,Michel QUINTARD. (2019), *Transferts de chaleur dans les milieux poreux - Changement de phase*,Université Toulouse midi Pyrénées .
- [27] NOREN(2015)*Forced Convection Cooling* ,*Thermal Solution* .
- [28] H.Jaona (2006), *RANDRIANALISOA*
- [29] Jean-François Cornet (2007), .
- [30] Hervé.Thierry KAMDEM TAGNE, (2008).
- [31] Jean Philippe GRIVET(2009)*Méthodes numériques appliquées pour le scientifique et l'ingénieur*. *Collection Grenoble sciences*, *EDP sciences*.
- [32] Ernst, Priv-Doz Dr O(2004) *Numerical Modelling of Uncertainty in Porous Media Transport by the Stochastic Finite Element Method*.
- [33] Tartakovsky, Daniel M and Dentz, Marco(2019)*Diffusion in porous media: phenomena and mechanisms*, *Transport in Porous Media*, Springer.

Résumé

Dans ce travail nous nous intéressons aux différents types de transfert de chaleur dans les matériaux poreux. Au début (Chapitre I) nous avons défini les milieux poreux et leurs propriétés. Nous avons conclu que les propriétés des milieux poreux dépendent de leur structure, de la taille des pores et de la composition. Dans le deuxième chapitre, nous avons examiné différentes voies de transfert de chaleur en général et dans les milieux poreux en particulier, et analysé leur place dans la recherche. Nous avons conclu que pour une étude approfondie des transferts de chaleur dans les matériaux poreux, trois types d'échanges doivent invariablement être considérés. Dans le chapitre précédent, nous avons discuté du modèle numérique de transfert de chaleur. En fait, nous avons résolu l'équation de diffusion de la chaleur (équation de conductivité) dans les milieux poreux. Nous nous intéressons à l'évolution de la chaleur (solution) pour différents milieux poreux en modifiant le coefficient de conductivité thermique, qui varie selon le milieu poreux. Nous avons également étudié la solution de l'équation de la chaleur pour différentes conditions aux limites. Nous avons observé que ces conditions aux limites n'affectent pas la transmission dans le milieu poreux.

Abstract

In this study, we focus on the different types of heat transfer in porous materials. At the beginning (Chapter I) we defined porous environments and their properties. We have concluded that the properties of porous environments depend on their structure, pore size and composition. In the second chapter, we examined different heat transfer pathways in general and in porous media in particular, and analyzed their place in research. We concluded that for a thorough study of heat transfer in porous materials, three types of exchange must invariably be considered. In the previous chapter, we discussed the numerical heat transfer model. In fact, we solved the heat diffusion equation (conductivity equation) in the porous environment. We are interested in the evolution of heat (solution) for different porous environments by modifying the thermal conductivity factor, which varies according to the porous environment. We have also studied the solution of the heat equation for different boundary conditions, observing that these boundary conditions do not affect the transmission in the porous environment.