

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عمّار تليجي بالأغواط  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT Sciences de la Matière



## *Mémoire de Master*

**Domaine : Sciences de la matière**

**Filière : Physique**

**Option : Physique Appliquée**

**Par : Benchaâ Yamina**

### THEME

---

## **Etude de la perméabilité à eau d'un matériau céramique poreux**

---

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

LAGOUNE Brahim

MCA

Président

LOKBAICHI Ahmed

MAA

Examineur

ABDLLAH Abdelouhab

MAA

Examineur

KADIRI Cheikh

MAA

Rapporteur

**Année Universitaire 2017- 2018**

# *Remerciements*

*Tout d'abord je remercie mon encadreur Mr Kadiri cheikh. pour avoir encadré mon projet, et pour le soutien, le suivi, et l'aide sans oublier sa disponibilité et ses conseils précieux, tout au long de ce travail .*

*Une partie de ce travail est réalisé dans le laboratoire pédagogique de physique nous remercions vivement les techniciens et ingénieurs de ce laboratoire pour l'aide et les efforts permettant de finaliser ce travail .*

*Je remercie également le jury de bien vouloir examiner mon projet.*

*En fin ...un grand merci pour mes parents qu'ils m'ont encouragé toujours dans ma vie et mes études moralement et affectivement.*

*Benchaà Yamina*

# *Sommaire*

## *Sommaire*

---

Introduction.....	1
Chapitre I. Recherche Bibliographique.....	3
I. 1. Porosité.....	3
I. 1. 1. Porosité idéale.....	5
I. 1. 2. Porosité réelle.....	5
I. 1. 3. Types de porosité.....	6
I. 1. 3. a. Porosité efficace.....	6
I. 1. 3. c. Porosité cinématique.....	7
I. 2. Tortuosité.....	7
I. 3. Longueur caractéristique visqueuse.....	8
I. 4. Perméabilité.....	9
Chapitre II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux.....	11
II. 1. Equation de Navier-Stocks. ....	11
II. 2. Régimes d'écoulement.....	13
II. 3. Modèle à 1D. ....	16
II. 4. Modèle à 2D. ....	20
Chapitre III. Modèle de Kozeny-Carman.....	24
III. 1. Conductivité hydrodynamique.....	24
III. 2. La perméabilité.....	26
III. 2. 1. Influence de la porosité.....	27
Chapitre IV. Etude Expérimentale.....	29
IV. 1. Origine du matériaux poreux ....	29
IV. 2. Forme du matériau. ....	29
IV. 3. Protocole expérimentale. ....	30
IV. 3. 1. Calcul du flux. ....	32
IV. 4. Mesure de la porosité. ....	34
IV. 5. Mesure des rayons des pores. ....	34

IV. 5. 1. Principe de la technique.....	35
IV. 5. 2. Fonctions principales.....	36
IV. 5. 3. Images obtenus.....	36
Chapitre V. Résultats et Discussions.....	37
V .1. Représentations des Résultats expérimentales. ....	38
V .1. 1.Le flux de saturation.. ....	38
V. 1. 2. Variation de flux de saturation. ....	39
V. 3. La loi de Darcy. ....	41
V. 4. Microscope électronique. ....	43
V. 5. Résultats du modèle de Kozeny-Carman .....	44
Conclusion.....	45
Références Bibliographiques.....	47

Fig.I. 1. Quelques formes de Matériaux poreux. ....	3
Fig. I. 2. Deux types de porosités, la première est ouverte où les pores sont interconnectés la deuxième est dite fermée ou occluse où les pores ne sont pas connectés avec eux même ni avec l'extérieur.....	4
Fig.I. 3. Modélisation de la porosité par empilement régulière de sphères. ....	5
Fig.I. 4. Illustration de la notion de la tortuosité. Le fluide possède un trajet $L_g$ ou $L_h$ différent du trajet $L_s$ .....	7
Fig. I. 5. La longueur caractéristique visqueuse par rapport à la géométrie du pore. ....	8
Fig.II. 1. Graphique illustre les divers régions du flux. Flux pré-Darcy et le flux de Darcy se produisant dans la région laminaire, la transition entre le flux laminaire et turbulent est appelé le flux de Forchheimer, enfin la région entièrement turbulent où les forces de viscosité sont négligées .....	14
Fig.II. 2 : Portion de matériau poreux (bouchon) dans un tuyau. Le rayon du tuyau est R, qui est le même rayon comme la bouchon. La longueur de bouchon est notée $w$ .....	17
Fig. II. 3 : Le débit prévu à travers le bouchon $Q_m$ en fonction de la pression. La perméabilité $1.27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ est calculé à partir de l'équation II. 24 en utilisant $\phi = 0.46$ and $d_m = 14 \mu\text{m}$ . .	20
Fig. II. 4. Flux à deux dimensions 2D dans un tuyau cylindrique de matériau poreux.....	21
Fig.II. 5. Le flux dans un tuyau poreux. Les pressions $p_{in}$ , $p_{out}$ et $p_{perm}$ sont défini comme constant. ....	22
Fig. III. 1. Illustration de la structure interconnecté des pores de l'espace effectif.....	24
Fig. III. 3. Structure poreuse d'un ensemble de capillaire presque sphérique.....	26
Fig. III. 3. Variation de la perméabilité en fonction de la porosité selon l'équation de Kozeny-Carman.....	28
Fig. IV. 1. Forme tubulaire du matériau poreux élaboré à base de silice et 30% dolomite, fritté à $1300 \text{ C}^\circ$ pendant une heure.....	29
Fig.IV. 2 . Dispositif expérimentale pour la mesure de la perméabilité. ....	30
Fig. IV. 3. L'équipement expérimentale pour la mesure de la perméabilité dans le laboratoire de physique .....	31

Fig. IV. 4. Type de manomètre utilisé pour mesurer les pression en bar.....	32
Fig. IV. 5. Mesure de la porosité par une simple expérience.....	34
Fig. IV. 6. Image d'un appareil MEB ainsi que schématisation de ses composants.....	35
Fig. IV. 7. Image MEB du matériau poreux utilisé dans les expérience de la perméabilité.....	37
Fig. V .1: La variation du flux en fonction de temps pour une pression de 0.6 bar.....	39
Fig.V. 2. Variation de flux en fonction de temps pour différentes valeurs de pressions .....	41
Fig.V. 3. variation de flux de saturation en fonction de pression. ....	42
Fig. V. 4. Les images MEB de différentes agrandissements.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

*Tableau IV. 1.* Les caractéristiques géométriques du matériau poreux élaboré par extrusion..30

*Tableau IV. 2.* Les résultat d'une expérience de mesure de la perméabilité pour une pression de 0.2 bar.....33

*Tableau V. 1.* Variation du flux en fonction du temps pour une pression de 0.6bar.....38

*Tableau V. 2.* Variation de flux en fonction de temps et de pression..... 39

*Tableau V.3.* Variation de flux de saturation en fonction de pression. .... 41

$\phi$	porosité
V	le volume
$\tau$	tortuosité
$\Lambda$	longueur caractéristique visqueuse
Q	le débit volumique
$\Phi$	le flux
K	conductivité hydraulique
k	perméabilité
$\eta$	viscosité dynamique
$\rho$	densité volumique du fluide
g	la gravité
P	la pression
u	vecteur de vitesse
v	la vitesse
$d_0$	longueur caractéristique
$V_0$	vitesse caractéristique
Re	le nombres de Reynolds
t	le temps
$\tilde{t}$	temps normalisé
x	vecteur de position
w	la longueur de bouchon
L	la longueur de tuyau poreux
$Q_{tm}$	le débit à travers un bouchon
$Q_{tuyau}$	le débit volumique à travers un tuyau
$P_{in}$	pression à l'entrée
$P_{out}$	pression à la sortie
$P_{perm}$	pression à la sortie du perméat

A	Aire
$d_m$	diamètre des particules
$d_h$	diamètre hydraulique
$c_0$	facteur de forme sans dimension
S	surface de particule

# *Introduction*

Les matériaux céramiques poreux (PCM) sont largement utilisés dans différentes industries, en particulier environnementale, biomédicale et plusieurs d'autres. On peut citer beaucoup d'applications: des supports de membranes pour microfiltration, ultrafiltration et nanofiltration. Les PCM sont aussi utilisés comme des isolants thermiques dans les constructions civiles et dans les usines pour empêcher le transfert de chaleur. Dans le domaine de l'ingénierie biomédicale les PCM sont largement utilisés comme des composants de pièces. Leur rôle dans le développement de nouveaux catalyseurs, porteurs et support de catalyseur est très important pour des nouvelles technologies dont les applications environnementales sont les plus connues.

Des considérations économiques consistant à diminuer le coût de fabrication des matériaux sont les principales motivations poussant les chercheurs à développer des PCM à partir des ressources naturelles. Comme un exemple, les membranes asymétriques utilisées dans des applications de filtration sont usuellement composées de deux couches. La première consistant d'une couche externe fine responsable de la séparation des composés, tandis que la deuxième est constituée d'un matériau poreux support important généralement la résistance mécanique nécessaire à la membrane. Pratiquement, les supports commerciaux fabriqués à partir des matériaux artificiels constituent la part importante du prix des membranes. Par conséquent, plusieurs auteurs ont focalisé leurs recherches pour développer des supports à faible prix fabriqués à partir des matériaux naturels brutes comme l'argile, le dolomite et la silice.

Les matériaux poreux sont caractérisés par leurs structures poreuses incluant: porosité, dimension des pores, morphologie, et distribution des pores. Ces caractéristiques sont connues être les propriétés clés des matériaux poreux à cause de leur influence considérable sur les propriétés dites secondaires: perméabilité, surface spécifique, rugosité et absorption de l'eau...etc.

Dans notre mémoire on va étudier la perméabilité à l'eau d'un matériau céramique poreux élaboré dans le laboratoire de Nanomatériaux de l'université de Sedik Ben Yahia de la Willaya de Jijel à base de silice et de dolomite. Cette étude est divisée en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre on résume les principales caractéristiques des matériaux poreux. Ces caractéristiques sont: la porosité, la tortuosité, la perméabilité et la longueur

visqueuse. Ces dernières ne sont pas indépendantes, une relation explicite et implicite relie les un aux autres.

Dans le deuxième chapitre on a utilisé le modèle hydrodynamique pour prouver l'existence de la loi de Darcy pour 1D et 2D. Cela va justifier le calcul expérimentale de la perméabilité par la méthode de flux volumique en fonction de la pression appliquée.

Dans le chapitre trois le modèle de Kozeny-Carman est utilisé pour modéliser la perméabilité en fonction de la porosité, la tortuosité et le facteur géométrique. Cette étude permet d'optimiser ces paramètres pour obtenir des valeurs se concordant avec les études expérimentales.

Dans le chapitre quatre on a exposé une étude expérimentale de la perméabilité en utilisant la lois de Darcy. Cette étude est basée sur la variation de la pression appliquée et en même temps la mesure de flux résultant. Une adaptation de forme du matériau pour cette étude de flux tangentielle nous a obligée à choisir la forme tubulaire. Les différent paramètres de la structure influençant la perméabilité ont été mesuré où estimé. La porosité a été mesuré par une simple expérience tandis que les rayons des pores nécessite l'utilisation de la microscope électronique à balayage (MEB).

Dans le dernier chapitre on a présenté les divers résultats obtenus avec les discussions nécessaires. Le modèle de Darcy de l'écoulement est un lois dont l'utilisant permet de trouver expérimentalement la perméabilité de l'eau dans un milieu poreux. En utilisant l'équation de Kozeny-Carman une relation entre la perméabilité et les différents paramètres de la structure explique bien l'interdépendance de ces paramètres envers la complexité des matériaux poreux.

# **Chapitre I**

## ***Introduction générale***

La définition des matériaux poreux est très intuitive : on peut les considérer comme des mélanges de solide et de fluide qui s'interpénètrent en des géométries complexes. Il existe de nombreux types de matériaux poreux: mousse polymère, mousse métallique, céramique, laine, feutre, panneaux perforés, tissus, matériaux biologiques, ...etc. La figure I. 1 illustre quelques formes de ces matériaux.

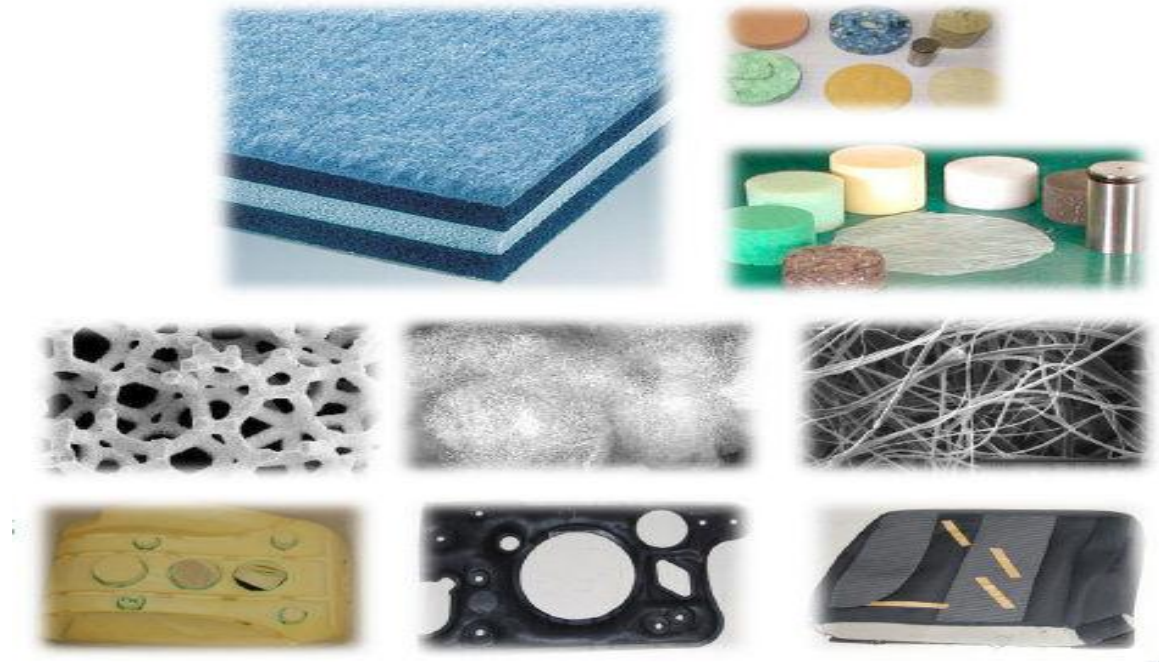


Fig. I. 1. Quelques formes et types de matériaux poreux.

On peut décrire les matériaux poreux par quatre paramètres : la porosité, la tortuosité, la perméabilité et la longueur caractéristique visqueuse. Il existe plusieurs paramètres géométriques que l'on peut associer à une structure poreuse. Ceux dépendant uniquement de la forme du solide poreux et ne varient pas lorsqu'on dilate ou on change l'échelle du solide, c'est le cas de la porosité et de la tortuosité. Ceux dépendant des dimensions, c'est le cas de la perméabilité ( à forme égale considéré comme une surface ) et de la longueur caractéristique visqueuse qui varie comme une longueur.

Dans les paragraphes suivantes on va définir les quatre paramètres physiques caractérisant les matériaux poreux.

### I. 1. Porosité.

La porosité peut être définie comme étant l'aptitude d'un matériaux poreux de comporter des pores, c'est à dire des vides interstitiels interconnectés ou non. Elle est donc

définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un matériaux poreux et comme un paramètre qui l'exprime quantitativement .

En générale la porosité d'un matériaux poreux est le rapport entre le volume occupé par le fluide  $V_f$  et le volume total  $V_T$  du matériau:

$$\phi = \frac{V_f}{V_T} \quad \text{I. 1.}$$

En notant que  $V_s$  est le volume de la phase solide, on a  $V_T = V_f + V_s$ , on peut déduire:

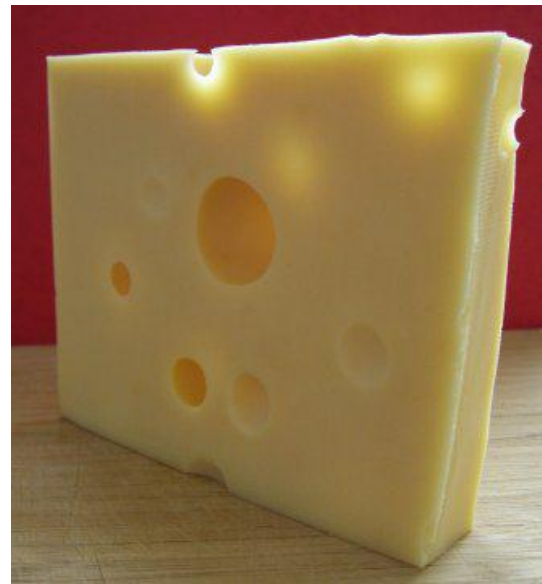
$$\phi = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad \text{I. 2.}$$

A partir de ces deux formules on peut déduire que la porosité est comprise entre 0 et 1. Les matériaux poreux utilisés pour l'absorption acoustique (mousses polyuréthanes, laine de verre...) ont généralement une porosité comprise entre 0.85 et 0.99. Les matériaux céramiques poreux prendre des valeurs inférieures [1].

Si les pores sont connectés entre eux et avec l'extérieur, on parle de porosité ouverte. Si ce n'est le cas ou s'il existe au sein du matériau des inclusions fermées, la porosité est dite occluse ( dite aussi fermée ).



a: Porosité ouverte



b: Porosité fermée

Fig. I. 2. Deux types de porosités, la première est ouverte où les pores sont interconnectés la deuxième est dite fermée ou occluse où les pores ne sont pas connectés avec eux même ni avec l'extérieur.

### I. 1. 1. Porosité idéale.

La complexité des matériaux poreux a poussé les scientifiques de les modéliser par des divers modèles. Les milieux poreux pouvant être ainsi représenté par des empilements réguliers de sphères ou de cylindres [2]. A partir de ces modèles on peut donc retrouver les différents paramètres tels que les caractéristiques mécaniques, la porosité, la tortuosité, la grandeurs caractéristique visqueuse et la perméabilité. La figure I. 3 représente les différents empilements possibles des sphères composant un matériau poreux.

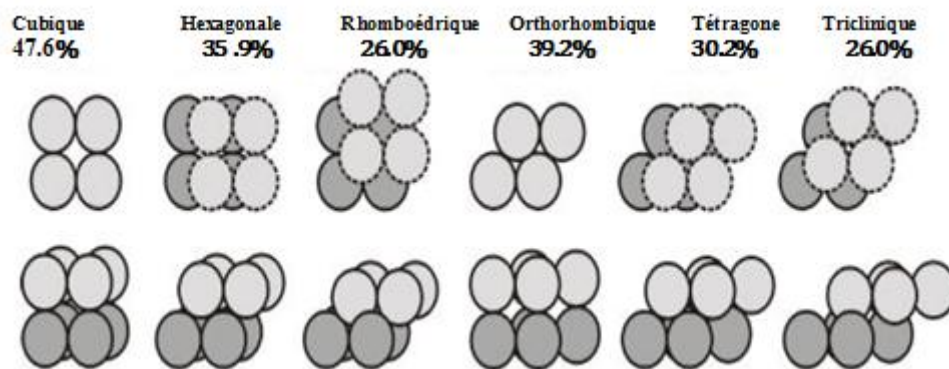


Fig. I. 3. Modélisation de la porosité par empilement régulière de sphères.

Les espaces poreux pouvant être considérés comme étant l'espace entre les sphères, nommé espace intergranulaire, ou celui formé par les sphères elles-mêmes, nommé espace vacuolaire. On peut voir que la porosité est indépendante de la taille des grains lorsque ceux-ci sont ordonnés de façon régulière.

Cependant dans la plupart des cas pratiques cette régularité est absente. Lorsque l'empilement est aléatoire, la porosité ne peut être calculée de façon simple et une étude statistique doit être menée.

### I. 1. 2. Porosité réelle.

Les matériaux poreux réels ont des géométries beaucoup plus complexes, outre la complexité due à la distribution aléatoire. Cette complexité géométrique est augmentée par le fait que la plupart des méthodes d'observation restent majoritairement bidimensionnelle. Afin de classifier les différents types de porosités, les géologues ont proposé une classification appelée classification de Choquette et Pray. Ils ont proposé une méthode consistant à définir

l'espace poreux comme le complément de la matrice solide [3]. Trois types de pores sont définis:

1. l'espace entre les grains (intergranulaire),
2. l'espace poreux à l'intérieur des grains( intragranulaire) et
3. celui créé à partir de la dissolution de grains (moldique).

Cette description peut être affinée grâce à la dépendance de cette porosité par rapport à la structure initiale du matériau . La porosité qui dépend uniquement de la structure appelé la porosité «fabric sélective». La porosité qui due à l'altération de cette structure est appelée « non fabric sélective ».

### I. 1. 3. Types de porosité.

#### I. 1. 3. a. Porosité efficace.

Cette porosité peut être définie par le rapport du volume de l'eau gravitaire  $V_e$  (que l'échantillon peut contenir à l'état saturé puis libéré) à son volume totale  $V_T$ . Elle dépend essentiellement de l'arrangement de la surface spécifique des grains. Elle est donnée par la formule:

$$\phi_e = \frac{V_e}{V_T} \quad \text{I. 3.}$$

#### I. 1. 3. b. Porosité effective ( dynamique ).

Elle correspond à la partie de la porosité dans laquelle le fluide pourra circuler, c'est-à-dire le réseau poreux, et est constituée d'une combinaison de pores et/ou de fissures interconnectés . La circulation des fluides dans le réseau poreux est contrôlée essentiellement par les pores dont le rapport de forme est faible (fissures, joints de grains, tubes, ... ). Les pores dont le rapport de forme est élevé contribuent fortement à l'emménagement du fluide .

$$C_r = \frac{V_r}{V_T} \quad \text{I. 4.}$$

I. 1. 3. c. Porosité cinématique.

Elle désigne le rapport de l'eau non liée aux grains ( l'eau pouvant circuler) au volume totale. Cependant, elle n'est pas mesurable pratiquement. Ce concept est proche de la porosité efficace, définit comme un rapport des volumes. Heureusement, cette grandeurs n'est pas utilisable que pour des applications bien spécifique.

I. 2. Tortuosité.

La tortuosité est un paramètre géométrique décrivant l'aspect sinusoïde des pores, cet aspect est la cause essentielle du couplage inertiel entre fluide et la structure poreuse, qui apparaît comme une masse ajoutée au fluide.

Cette notion permet de rendre compte de la complexité du chemin parcouru par le fluide dans le milieu poreux. Pour un échantillon de longueur  $L_s$ , la longueur  $L_g$  d'un canal tortueux qui le traverse de part et d'autre est généralement plus grande que  $L_s$ . La figure I. 4 illustre cette notion.

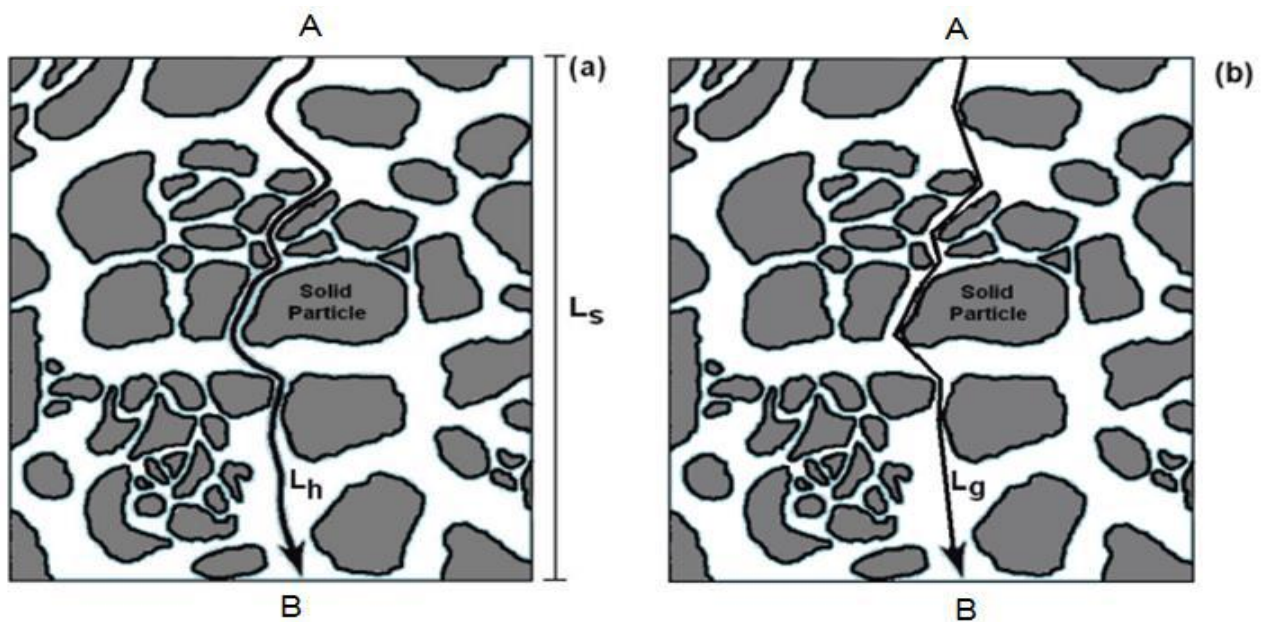


Fig. I. 4. Illustration de la notion de la tortuosité. Le fluide possède un trajet  $L_g$  ou  $L_h$  différent du trajet  $L_s$ .

On définit alors la tortuosité comme le rapport de ces deux longueurs (ou du carré de ces longueurs) :

$$\tau = \frac{L_s}{L_g} \quad \text{I. 5}$$

Dans le cas où les canaux sont rectilignes, nous avons  $\tau = 1$ . Pour des canaux quelconques  $\tau < 1$ . Pour des matériaux faiblement poreux, la valeur de la tortuosité peut être très inférieur à l'unité, cependant pour les mousses métalliques ou céramiques, des valeurs légèrement inférieurs à 1 sont largement rencontré [4].

Il est remarquable que si la définition de la tortuosité est l'inverse, les valeurs de  $\tau$  sont supérieur à 1.

### I. 3. Longueur caractéristique visqueuse.

La définition intuitive de la longueur caractéristique visqueuse est le rayon le plus petit dans la géométrie du pore, voir la figure I. 5. Les travaux de Johnson en 1987 ont explicités les caractérisations des effets visqueux en introduisant une grandeur physique qui l' a appelée la longueur caractéristique visqueuse. Cette grandeur est donnée par la formule:

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int su^2 ds}{\int Vu^2 dV} \quad \text{I. 6.}$$

Où  $u$  est la vitesse microscopique d'un fluide parfait incompressible,  $S$  est l'aire de l'interface entre les phases solide et fluide et  $V$  est le volume du fluide.

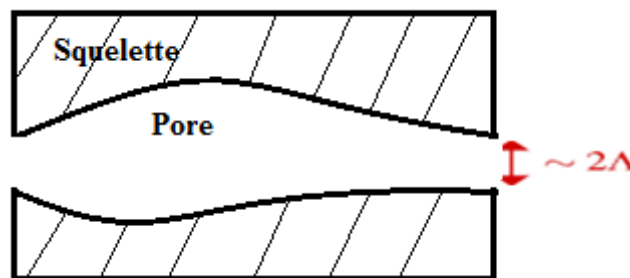


Fig. I. 5. La longueur caractéristique visqueuse par rapport à la géométrie du pore.

Cette définition vaut pour une surface solide fluide régulière et pour une épaisseur de couche limite faible devant le rayon de courbure caractéristique de l'interface. Lorsque la surface des pores présente des singularités (pointes), cette définition de la longueur

caractéristique n'est plus valable. Le paramètre  $\Lambda$  est un indicateur de la taille des pores étroites, lieu privilégié des échanges visqueux.

#### **I. 4. Perméabilité.**

La perméabilité d'un matériaux poreux caractérise son aptitude à laisser circuler un fluide au sein de son espace poreux. Elle dépend de la structure interne de l'espace poreux et particulièrement de la connectivité de ses différents éléments. On peut dire que c'est une propriété de transport macroscopique exprimant le rapport entre une force (gradient de pression) imposée à un fluide pour traverser le milieu et le débit résultant. On peut mesurer la perméabilité d'un milieu à l'échelle de l'échantillon dans le laboratoire, dans le terrain, ou bien l'évaluer en modélisant la circulation des fluides dans un milieu poreux dont on connaît la microstructure [5]. La formule suivante illustre cette relation.

$$Q = Ks \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad \text{I. 7.}$$

Q: le débit volumique.

$\frac{\Delta p}{\Delta x}$  : le gradient de pression.

$K$  (m/s): la conductivité hydraulique appelée aussi le coefficient de perméabilité du milieu poreux, qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.

$S$  : la surface de la section étudiée ( $\text{m}^2$ ).

Cette formule décrit la loi de Darcy(Henry Darcy, 1856) permettant de relier un débit à un gradient de pression appliqué au fluide grâce à un paramètre caractéristique du milieu traversé : la perméabilité  $K$  (hydraulique générale).

La perméabilité  $K$  est défini par la formule suivante :

$$K = \frac{k}{\eta} \quad \text{I. 8.}$$

La formule générale du débit est ainsi donnée par:

$$Q = \left( \frac{k}{\eta} \right) s \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad \text{I. 9.}$$

La perméabilité  $K$  s'exprime en  $\text{m}^2$ . Lorsque les unités suivantes sont utilisées :  $Q$  en  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $s$  en  $\text{cm}^2$ ,  $\Delta P/\Delta x$  en  $\text{atm} \cdot \text{cm}^{-1}$  et  $h$  en poises, la perméabilité  $k$  s'exprime également en Darcy. Ainsi  $1 \text{ Darcy} = 0,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Le darcy est couramment utilisé par les hydrogéologues et par les pétroliers. Le  $\text{m}^2$  est plutôt utilisé par les physiciens des matériaux.

# **Chapitre II**

## *Modèle*

### *Hydrodynamique dans*

### *Un milieu poreux*

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

---

Dans ce chapitre on va expliciter les divers équations fondamentales d'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. En même temps les différentes valeurs des paramètres d'écoulement vont être étudiés.

Pour le flux à 1D on va tester l'applicabilité de la loi de Darcy dans une portion ( un bouchon ) du matériau poreux. Ceci est fait en supposant un écoulement laminaire, puis en appliquant la théorie de l'écoulement laminaire.

Pour le flux a 2D, la pression à l'intérieur d'un tube poreux est étudiée. Lorsque le fluide pénètre dans le canal, la pression à l'intérieur du tuyau baisse. Cette chute de pression est calculée car elle peut avoir une influence significative sur la vitesse d'écoulement dans la couche poreuse à travers le tuyau.

### II. 1. Equation de Navier-Stocks.

Le flux dans les canaux ouverts (tuyau) suit la théorie de la mécanique des fluides standard. La conservation du moment linéaire est donnée par l'équation de Navier -Stocks, basée sur la seconde loi de newton. Pour les fluides incompressibles cette équation est donné par l'expression de l'équation II. 1.

$$\rho \left[ \partial_t u + (u \cdot \nabla) u \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 u + \rho g \quad \text{II.1}$$

Où:

$\rho$  : la densité volumique du fluide,

$p$  : la pression,

$u$  : vecteur de vitesse,

$\eta$  : la viscosité dynamique du fluide.

Les termes du côté gauche de cet équation sont les forces d'inertie, et les termes de droite sont le gradient de pression et les forces de viscosité respectivement. Le terme  $\rho g$  concernant l'influence de la gravité est négligé tout au long de ce chapitre.

Il s'avère commode de non -dimensionner l'équation de Navier Stocks en utilisant les variable adimensionnelles suivantes. En utilisant une échelle de longueur typique  $d_0$  , et une vitesse caractéristique de l'écoulement  $V_0$  on obtient les relations suivantes:

$$r = d_0 \tilde{r} \quad \text{II. 2a}$$

$$u = V_0 \tilde{u} \quad \text{II. 2b}$$

$$t = \frac{d_0}{V_0} \tilde{t}, \quad \text{II. 2c}$$

$$p = \frac{\eta V_0}{d_0} \tilde{p} \quad \text{II.2d}$$

Après l'insertion de ces relations dans l'équation II.1 on trouve:

$$Re (\partial_t \tilde{u} + (u \cdot \nabla) \tilde{u}) = -\nabla p + \nabla^2 \tilde{u} \quad \text{II. 3.}$$

Où le tilde indique la forme non-dimensionnelle.

Le paramètre sans dimension  $Re$ , dit le nombre de Reynolds, apparaît naturellement comme:

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho V_0 d_0}{\eta} \quad \text{II. 4.}$$

Le nombre de Reynolds caractérise complètement les différents régimes d'écoulement. Il est défini par le rapport de la force d'inertie sur la force de la viscosité.

Si  $Re$  est petit les forces visqueuses sont prédominantes, ce qui signifie que les forces d'inertie peuvent être négligées, dans ce cas le flux est laminaire, et l'équation II. 3 devient :

$$\nabla p = -\nabla^2 u \quad \text{II. 5.}$$

Cette équation s'appelle l'équation de Stokes.

Si  $Re$  est élevé, le flux laminaire va se perturber et devenir instable, et les forces d'inertie vont alors dominer le flux. Si le niveau devient suffisamment élevé, le flux évoluera vers un nouveau régime d'écoulement pleinement turbulent.

La turbulence a les caractéristiques suivantes :

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

- fluctuation temporelle et spatiale de la pression et de la vitesse. La vitesse fluctue en trois dimensions.
- Des tourbillons de différentes tailles se forment.
- Écoulement auto-soutenable. En particulier dans les écoulements à paroi l'écoulement turbulent peut se maintenir en produisant de nouveaux tourbillons pour remplacer ceux qui sont perdus par la dissipation visqueuse. Les tourbillons sont produites par la contrainte de cisaillement de la paroi du matériau et dans le fluide.
- Le mélange est beaucoup plus fort dans un écoulement turbulent que celui d'un écoulement laminaire, les tourbillons se déplacent en trois dimensions.

La vitesse et la pression dans un régime turbulent sont normalement décrites par les moyennes temporels .

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u dt, \quad \bar{p} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p dt \quad \text{II. 6.}$$

Où  $t$  est plus grand que toute période de temps des fluctuations de  $u$ . La vitesse et la pression dans le fluide peuvent alors être définies comme :

$$u = u' + \bar{u} \quad \text{II. 7a.}$$

$$p = p' + \bar{p} \quad \text{II. 7b.}$$

En insérant ces relations dans l'équation de Navier - Stokes II. 3 pour l'écoulement du fluide on obtient:

$$\rho \left[ \partial_i \bar{u}_i + \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i \right] + \rho \partial_j \left( \overline{u_j u_i} \right) = -\partial_j \bar{p} + \eta \partial^2_j \bar{u}_i \quad \text{II. 8.}$$

### II. 2. Régimes d'écoulement.

En appliquant l'approche continue à la matrice poreuse, le flux dans les milieux poreux peut être divisé en quatre régions. En se basant sur un point de vue phénoménologique on distingue: l'écoulement de pré -Darcy, l'écoulement de Darcy, l'écoulement de Forchheimer et l'écoulement turbulent. En particulier l'écoulement de Darcy est régi par une loi linéaire. Les transitions entre ces régions sont lisses et continues, cependant il est difficile de déterminer le flux dans les zones de transition. La figure II. 1 montre en générale chaque régimes .

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

Le paramètre de démarcation entre ces divers régions est typiquement le nombre de Reynolds. L'équation II. 4 donne l'expression de ce nombre. On se basant sur le diamètre moyen des grains le flux de Darcy se produit si  $Re_{DL} < Re \leq 2.3$  où  $Re_{DL}$  est la limite inférieure pour le flux de Darcy, et est inférieure à  $10^{-5}$ . Dans un milieu simple où les particules peuvent être assimilées à des sphères on a  $5 < Re < 80$  le flux est de type Forchheimer. Enfin si  $Re > 120$  le flux est entièrement turbulent, la force visqueuse peut être négligée. Il est important de souligner que les valeurs du paramètre de Reynolds de démarcation indiquées ici sont les résultats du travail [6].

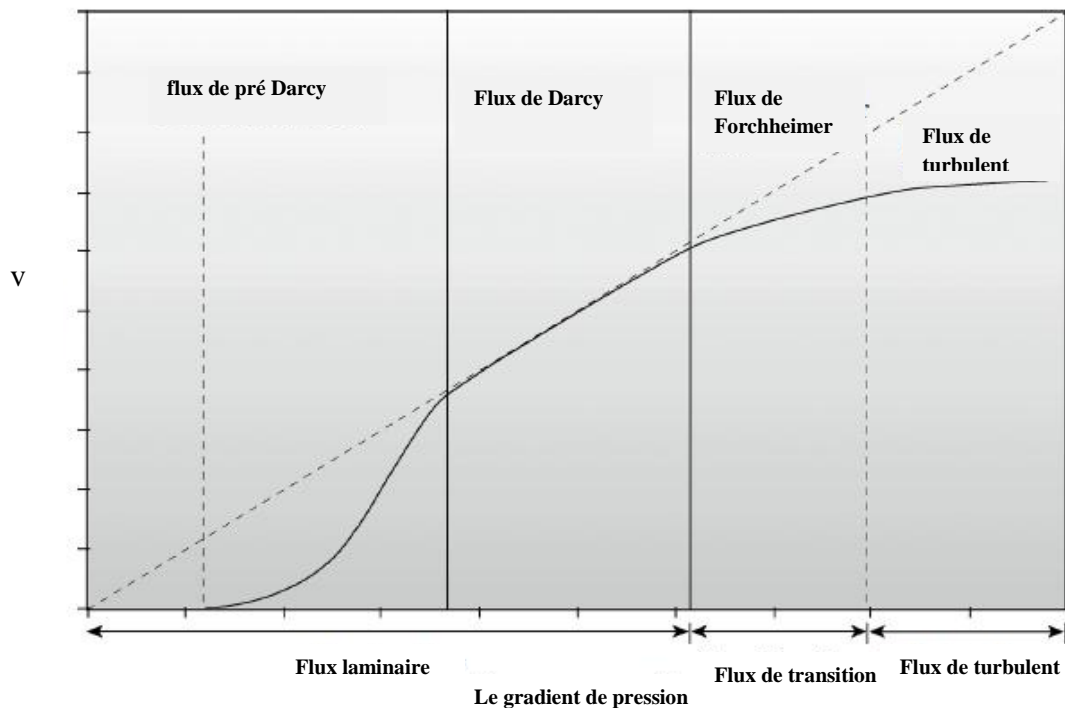


Fig. II. 1. Graphique illustre les divers régions du flux. Flux pré-Darcy et le flux de Darcy se produisant dans la région laminaire, la transition entre le flux laminaire et turbulent est appelé le flux de Forchheimer, enfin la région entièrement turbulent où les forces de viscosité sont négligées .

Parmi la communauté scientifique il existe un accord général sur l'existence des quatre régions d'écoulement de fluide dans un milieu poreux. Cependant les valeurs sont sujettes à des désaccords théoriques et expérimentales [7,8].

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

---

Le flux pré-Darcy est régi par des effets moléculaires et dépend donc de l'individu paramètre de débit. Il n'existe pas de théorie microscopique généralement acceptée pour décrire cet région du flux.

Généralement si Le flux de Darcy existe il peut être décrit par l'équation II. 9 qui est une expression de conservation de l'impulsion. Il décrit une certaine linéarité entre le débit et la pression appliquée. Cette loi est similaire à la loi d'ohm en électricité et la loi de Fourier en conduction thermique. La loi de Darcy est développée expérimentalement par Darcy en 1856 en utilisant un matériau poreux macroscopique composé d'une colonne de sable. Cependant, la loi de Darcy peut être dérivée d'une moyenne spatiale de l'équation de Stokes équation II. 5 [7].

$$\nabla p = \frac{16}{\phi} \frac{c_0}{\tau} \frac{\eta}{d_h^2} \mathbf{v} = \frac{\eta}{k} \mathbf{v} \quad \text{II. 9.}$$

Ou  $\mathbf{v}$  est la vitesse macroscopique du fluide définie comme  $\mathbf{v} = Q / A$ , et  $k$  est la perméabilité déjà défini dans le chapitre précédent.

Pour les matériaux poreux comme les membranes et leurs supports il est courant de supposer la validité de la loi de Darcy. Cependant les hypothèses suivantes doivent être valides pour appliquer cette loi :

- a. l'inertie peut être négligée, car la dérivation de l'équation II. 9 trouve son origine dans la théorie de l'écoulement laminaire.
- b. chute de pression constante dans le matériau poreux.
- c. le milieu est supposé isotrope, car les grains dans le matériau sont uniformément distribués. Si le milieu est anisotrope, la perméabilité varie dans l'espace.
- d. densité constante
- e. flux de fluide unique i.e. écoulement saturé.

En supposant le flux a 1D et une distribution de pression linéaire, la loi de Darcy devient:

$$\mathbf{v} = \frac{k}{\eta} \frac{\Delta p}{w} \quad \text{II. 10.}$$

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

---

Où  $\Delta p$  est la différence de pression à travers le corps du matériau, et  $w$  est l'épaisseur de matériau.

Lorsque les effets d'inertie commencent à influencer le flux, la loi de Darcy n'est plus applicable. Cela est dû à l'initiation de la turbulence dans le flux, comme il est décrit précédemment des tourbillons seront générés. L'équation de Forchheimer est l'extension de la loi de Darcy pour décrire le flux dans cette région. Dans ce cas l'énergie extraite par la turbulence est convertie en énergie cinétique des tourbillons, donc un terme supplémentaire est ajouté à la loi de Darcy,  $\rho \mathbf{v}^2$  dans le flux on a :

$$\Delta p = \frac{\eta}{k} \mathbf{v} + \beta \rho \mathbf{v}^2 \quad \text{II. 11.}$$

où  $\beta$  est le nombre de Forchheimer, avec l'unité  $[m^{-1}]$ , déduite expérimentalement.

Lorsque le flux est entièrement turbulent, les forces visqueuses sont ignorées, le flux est instable ce qui nécessite l'utilisation des méthodes statistiques pour décrire le flux .

### II. 3. Modèle à 1D.

L'étape initiale dans la recherche des équations régissant l'écoulement dans un matériaux poreux est de mettre en place un simple problème d'écoulement dans un tuyau avec une portion de matériau poreux comme il est montré dans la figure II. 2. L'écoulement dans le tuyau est supposé laminaire, et peut donc être décrit comme un écoulement Poiseuille-Darcy: écoulement Poiseuille dans le tuyau, et écoulement Darcy dans le milieu poreux de la portion. l'écoulement de Poiseuille-Darcy suit l'équation de Brinkman II. 12 qui est l'équation de Stokes étendue avec une force dissipative contre l'écoulement.

$$0 = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} - \alpha \mathbf{v} \quad \text{II. 12.}$$

Comme le terme dissipatif provient du milieu poreux,  $\alpha$  est choisi pour  $\alpha = \frac{\eta}{k}$  . En dehors du milieu poreux  $\alpha = 0$  et  $k$  est la perméabilité.

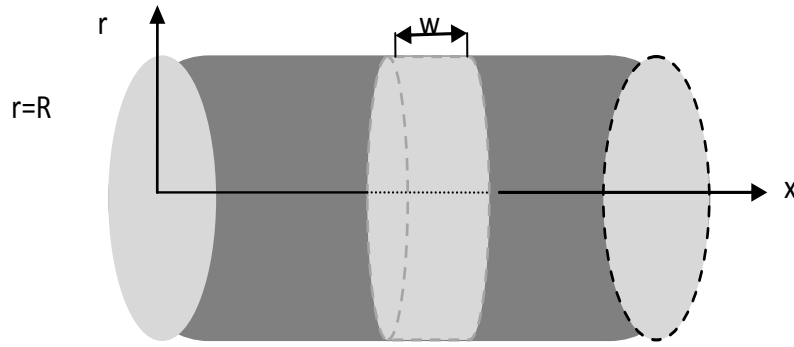


Fig. II. 2 : Portion de matériau poreux (bouchon) dans un tuyau. Le rayon du tuyau est  $R$ , qui est le même rayon comme la bouchon. La longueur de bouchon est notée  $w$ .

Avec l'hypothèse d'une perte de charge constante dans le milieu poreux,  $\nabla p = -\frac{\Delta p}{w}$ , l'équation II. 12 devient en utilisant des coordonnées cylindriques:

$$\frac{1}{r} \partial_r v_x + \partial_r^2 v_x = \frac{1}{k} v_x - \frac{1}{\eta} \frac{\Delta p}{w} \quad \text{II. 13.}$$

En utilisant les paramètres non dimensionnels  $l = \sqrt{k}$ ,  $s = \frac{r}{l}$ ,  $\tilde{s} = \frac{x}{l}$ ,  $v_0 = \frac{k}{\eta} \frac{\Delta p}{w}$  et

$$u_s = v_x(r) / v_0$$

on obtient l'équation différentielles sous sa forme standard II. 14.

$$u''(s) + \frac{1}{s} u'(s) - u(s) + 1 = 0 \quad \text{II. 14.}$$

La solution de cette équation est:

$$u_s = u_h(s) + u_p(s) \quad \text{II. 15.}$$

Où:

$u_p$  : la solution particulière .

$u_h$  : la solution homogène.

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

---

Une solution particulière est facilement perceptible  $u_p(s) = 1$ . L'équation homogène est reconnue comme l'équation de Bessel modifiée de l'ordre de zéro ce qui donne une solution homogène de genre :

$$u_h(s) = c_2 I_0(s) + c_1 K_0(s) \quad \text{II. 16.}$$

Ainsi la solution totale est donc:

$$u(s) = C_2 I_0(s) + C_1 K_0(s) + 1 \quad \text{II. 17}$$

Les conditions aux limites  $u(\tilde{s}) = 0$  et  $\partial_r u(r) = 0|_{r=0}$  en raison de la symétrie. Comme  $\partial_r k_0$  diverge pour  $r \rightarrow 0$  à cause de la partie logarithmique  $C_1$  doit être zéro. La première condition donne  $c_2 = -1/I_0(\tilde{s})$  et donc la solution devient :

$$u(s) = 1 - \frac{I_0(s)}{I_0(\tilde{s})} \quad \text{II. 18.}$$

Ce problème est étudié dans les deux limites  $\tilde{s} \ll 1$  et  $\tilde{s} \gg 1$ .

Dans la limite  $\tilde{s} \ll 1$  i.e.  $R \ll \sqrt{k}$  la solution peut être développée en utilisant la série :

$$I_0(s) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2^n n!)^2} s^{2n} = 1 + \frac{1}{2^2} S^2 + \frac{1}{2^2 4^2} S^4 + \frac{1}{2^2 4^2 6^2} S^6 + \dots \quad \text{II. 19.}$$

Si on utilise  $\tilde{s} \ll 1$  dans l'équation II. 18 on trouve:

$$u(s) = \frac{1}{4} (\tilde{s}^2 - s^2) \quad \text{II. 20.}$$

Avec l'insertion de la longueur et la vitesse spécifiques cette solution devient:

$$v_x(r) = \frac{1}{4\eta} \frac{\Delta p}{w} (R^2 - r^2) \quad \text{pour } R \ll \sqrt{k} \quad \text{II. 21.}$$

C'est la solution Poiseuille pour l'écoulement laminaire. Ce résultat est attendu parce que si la perméabilité  $k$  est grande le matériau ne donnera pas de résistance significative à l'écoulement et par conséquent l'écoulement se comportera comme s'il n'y avait pas de matériau poreux.

## **II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux**

---

Il est indispensable d'employer les paramètres géométriques caractérisant le matériau utilisé dans ce travail. Ce matériau est préparé en mélangeant le silice avec 30% de dolomite , la température de frittage est 1300°C pendant 1h, les données sont  $l=1.12 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ , et un rayon de  $R=2.7 \times 10^{-3} \text{ m}$  cela indique  $\tilde{s} = 2.41 \cdot 10^3$  qu' est plusieurs ordres de grandeur plus grande que 1.

Dans la limite  $\tilde{s} \gg 1$ . où  $R \gg \sqrt{k}$  ,  $I_0$  a la forme asymptotique:

$$I_0(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s}} e^s , \quad \text{II. 22.}$$

Ce qui donne:

$$u(s) = \begin{cases} 1 \\ 1 - \sqrt{\frac{\tilde{s}}{s}} e^{-(\tilde{s}-s)} \end{cases} , \quad s < 10^{-4} \tilde{s} \quad \text{II. 23.}$$

Il est donc une bonne approximation à utiliser  $u(s) = 1$  . La vitesse sera donc constante est sa valeur est:

$$v_x(r) = v_0 = \frac{k}{\eta} \frac{\Delta p}{w} \quad \text{pour} \quad R \gg \sqrt{k} \quad \text{II. 24.}$$

C'est précisément la loi de Darcy. On peut donc conclure que le flux dans la portion (bouchon ) peut être approché par la loi de la Darcy.

La relation attendue entre le débit  $Q_m$  et la différence de pression  $\Delta p$  est valide dans Fig. II. 3 si en effet la loi de Darcy est applicable pour les matériaux poreux, les expériences devraient produire un graphique similaire à celui-ci.

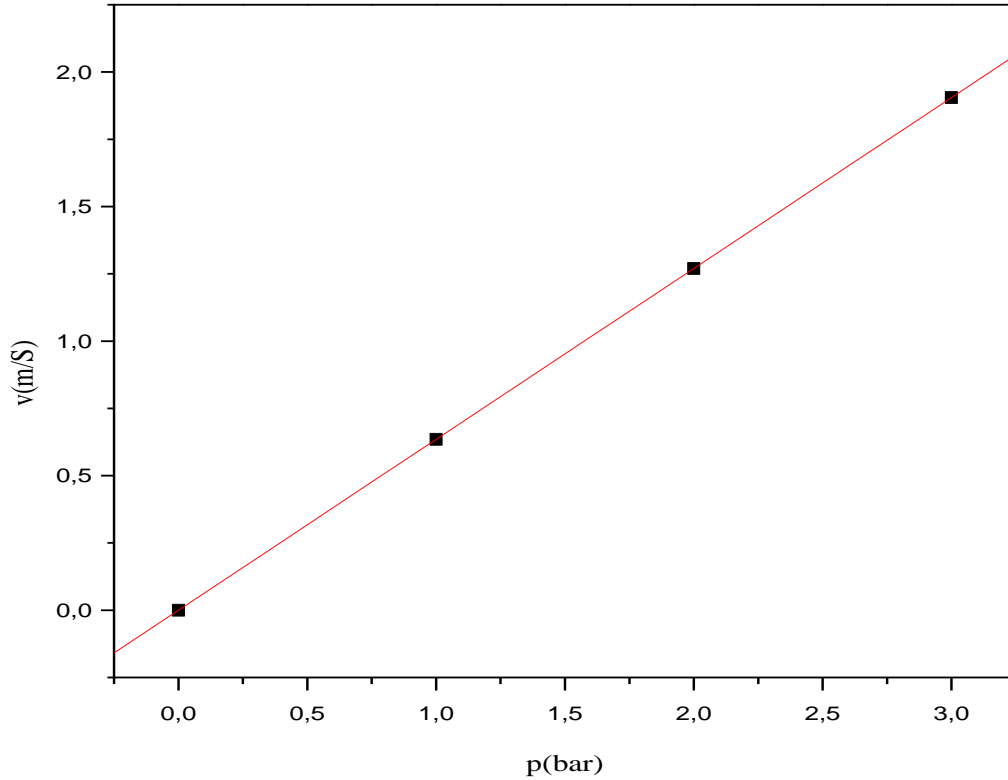


Fig. II. 3 :Le débit prévu à travers le bouchon  $Q_m$  en fonction de la pression. La perméabilité  $1.27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  est calculé à partir de l'équation II. 24 en utilisant  $\phi = 0.46$  and  $d_m = 14 \mu\text{m}$ .

### II. 4. Modèle à 2D :

Un matériaux poreux à écoulement transversal efficace est caractérisée par un flux élevé et bonne perméabilité dépendant tous les deux de la chute de pression à travers le canal, qui sera discutée dans cette section. Un schéma de l'écoulement est vu sur la figure II. 4 .

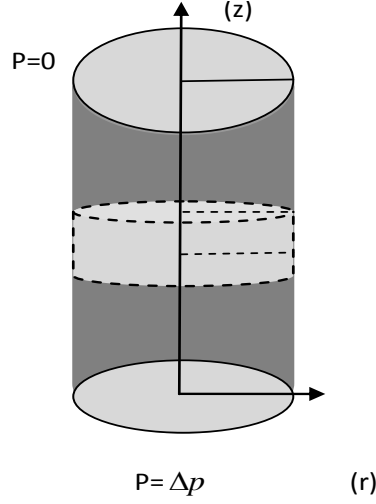


Fig. II. 4. Flux à deux dimensions 2D dans un tuyau cylindrique de matériau poreux.

Dans cette section, il est supposé que le flux dans le tuyau est laminaire, et que la loi de Darcy est valide. Due à la conservation de masse, la relation dans une section de longueur  $dx$  entre le débit du tuyau entrant  $Q_{tuyau}$ , le débit du tuyau sortant  $Q_{tuyau}(x+dx)$  et  $Q_{tm}$  à travers le mur perméable est, figure II. 5 :

$$Q_{tuyau}(x) = Q_{tuyau}(x+dx) + Q_{tm}(x)dx \quad \text{II. 25.}$$

Où l'indice  $tm$  est pour trans matériau poreux. Le flux le long de la pièce infinitésimale  $dx$  est supposé être un flux Poiseuille.

$$Q_{tuyau}(x) = \frac{\pi R^4}{8\eta} p'(x) \quad \text{II. 26.}$$

Il a été montré dans la section précédent que le flux dans le matériau poreux pourrait être décrit par la loi de la Darcy linéaire:

$$Q_{tm} = \frac{2\pi Rk}{\eta w} \Delta p(x) dx \quad \text{II. 27.}$$

qui, lorsqu'il est inséré dans l'équation II. 25 ensemble avec l'équation II. 26 redonnent:

$$-\frac{\pi R^4}{8\eta} p'(x) = \frac{k}{\eta w} \Delta p 2\pi r dx - \frac{\pi R^4}{8\eta} p'(x+dx) \quad \text{II. 28.}$$

## II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux

En tenant compte de  $\frac{p'(x+dx) - p'(x)}{dx} \approx p''(x)$  dans l'équation II. 28 on devient:

$$p''(x) = \lambda^2 \Delta p(x) \quad \text{II. 29.}$$

En utilisant  $\Delta p = p(x) - p_{perm.}$  la constante  $\lambda$  est donnée par

$$\lambda = \sqrt{\frac{16k}{wR^3}} \quad \text{II. 30.}$$

Regardons  $p_{perm} = 0$  la solution est:

$$p(x) = Ae^{\lambda x} + Be^{-\lambda x} \quad \text{II. 31.}$$

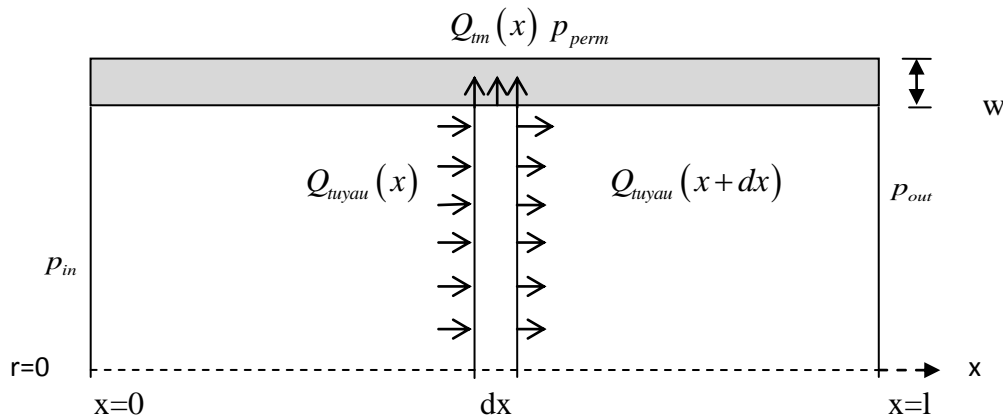


Fig. II. 5. Le flux dans un tuyau poreux. Les pressions  $p_{in}$ ,  $p_{out}$  et  $p_{perm}$  sont définies comme constantes.

Les conditions aux limites sont, comme on le voit sur la figure II. 5,  $p(0) = p_{in}$  et

$p(L) = p_{out}$ . La solution peut alors être écrite comme :

$$p(x) = \frac{e^{\lambda x} (p_{out} - p_{perm} - e^{-\lambda L} p_{in} + e^{-\lambda L} p_{perm})}{-e^{-\lambda L} + e^{\lambda L}} - \frac{e^{-\lambda x} (-p_{in} e^{\lambda L} + p_{out} - p_{perm} + p_{perm} e^{\lambda L})}{-e^{-\lambda L} + e^{\lambda L}} + p_{perm}$$

II. 32.

Il est évident d'essayer de réécrire II. 32 en utilisant le développement de Taylor. Les fonctions exponentielles deviennent:

## **II. Modèle Hydrodynamique dans un milieu poreux**

$$e^{\lambda x} = 1 + \lambda x + \frac{1}{2}(\lambda x)^2 \quad \text{II. 33.}$$

$$e^{-\lambda x} = 1 - \lambda x + \frac{1}{2}(\lambda x)^2 \quad \text{II. 34.}$$

En définissant  $p_{perm}$  égal à zéro, et l'insertion dans l'équation II.32 , ça cède :

$$p(x) = p_{in} + \frac{x}{L} \left[ p_{out} - p_{in} - (\lambda L)^2 \left( \frac{1}{3} p_{in} + \frac{1}{6} p_{out} \right) \right] + \frac{1}{2} (\lambda x)^2 \left[ p_{in} \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{3} p_{out} \frac{x}{L} \right]$$

II. 35.

Comme on peut le voir de II. 35 le terme  $(\lambda L)^2$  contrôle l'amplitude de l'écart par rapport à la perte de charge linéaire. En insèrent  $k=1.27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ ,  $L = 15 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,  $R = 2.7 \times 10^{-3} \text{ m}$  et  $w= 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ :

$$(\lambda L)^2 = 1.16 \cdot 10^{-2} \quad \text{II. 36.}$$

Comme  $(\lambda x)^2 \leq (\lambda L)^2 \ll 1$  on peut conclure que si le flux dans le tuyau est laminaire, la chute de pression est linéaire. Pour simplifier les calculs en utilisant la différence de pression entre le centre du tuyau et la pression à l'extérieur du tuyau, la pression trans matériau peut être approximée par:

$$P_{tm} = \frac{(p_{in} + p_{out})}{2} - p_{perm} \quad \text{II. 37.}$$

Selon [7] la pression trans dans toutes les situations d'écoulement dans les matériaux poreux ( à épaisseur faible ) à écoulement transversal peut être décrite par l'équation II. 37 , qui sera également appliqué dans cette thèse, sur la base des hypothèses et des calculs effectués précédemment. L'approximation de Darcy est théoriquement applicable sous ces conditions.

# Chapitre III

## *Modèle*

## *de Kozeny-Carman*

L'image générale de la matrice solide poreuse montre la complexité des matériaux poreux. Elle rend presque impossible la description exacte de la géométrie. Cependant, en combinant avec le fait que les pores sont à l'échelle micrométrique, il est possible et avantageux de décrire le milieu poreux comme un continuum, où la résistance hydraulique de chaque pore est moyennée à une résistance hydraulique du milieu.

Cette résistance dépend à la fois des propriétés du fluide et des propriétés de la matrice solide du milieu. Par analogie avec la loi d'Ohm en théorie électrique la conductivité est définie comme l'inverse de la résistance.

#### III. 1. Conductivité hydrodynamique.

La conductivité hydraulique d'un milieu poreux est dans la plus part des cas confondue à la perméabilité  $k$  avec l'unité ( $m^2$ ) et elle est typiquement utilisée pour fournir une indication de la capacité d'un milieu poreux à laisser pénétrer le fluide; une perméabilité élevée signifie un débit élevé .

Il y a trois propriétés macroscopiques, dont la perméabilité leurs dépendent dans un milieu consolidé.

Le premier est la porosité déjà définie dans le premier chapitre comme le rapport du volume de l'espace vide dans le milieu  $v_{vide}$  et le volume totale du milieu  $v_{total}$  :

$$\phi = \frac{v_{vide}}{v_{total}} \quad \text{III. 1.}$$

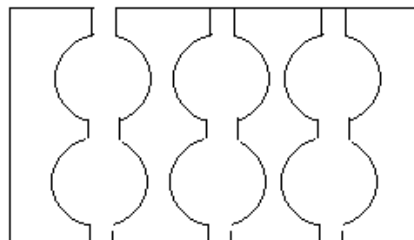


Fig. III. 1. Illustration de la structure interconnecté des pores de l'espace effectif.

Il convient de noter qu'il existe deux types d'espace vide qui peuvent être utilisés pour calculer la porosité: espace vide effectif et espace vide isolé. Les espaces poreux isolés sont les pores aveugles, qui ne sont interconnectés que d'un côté ou pas du tout. La première hypothèse concernant ce modèle est: le pourcentage de l'espace isolé est négligeable par rapport à l'espace vide effectif. La figure III. 1 illustre la structure interconnectée des pores de l'espace effectif.

La deuxième propriété concernant la perméabilité est la surface des particules  $A$  par unité de volume totale  $S$  donnée par l'expression:

$$S = \frac{A}{v_{total}} \quad \text{III. 2}$$

En supposant des particules sphériques et compacité totale du milieu par ces sphères,  $d_m$  étant le diamètre moyen des particules,  $S$  peut être décrit comme:

$$S = \frac{6}{d_m}$$

La troisième propriété est la tortuosité et est basée sur le fait que le chemin d'écoulement du fluide dans le milieu poreux est très compliqué, ou tortueux. En utilisant  $w$  comme étant la distance directe entre l'entrée et la sortie, et  $w_e$  comme étant la longueur du trajet d'écoulement réel, la tortuosité est définie ( déjà explicité dans le chapitre un ) comme:

$$\tau = \left( \frac{w}{w_e} \right)^2 \quad \text{III. 3}$$

Le diamètre hydraulique  $d_h$  est un terme couramment utilisé lors de calcul des écoulements dans des tubes et des canaux non circulaires. Soit un ensemble de capillaires représentant la structure poreuse dont les pores sont sphériques. La figure III. 2 montre un exemple de cette structure avec une structure presque sphérique.

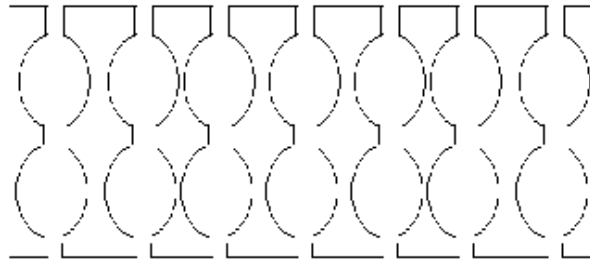


Fig. III. 3. Structure poreuse d'un ensemble de capillaire presque sphérique.

En utilisant le diamètre hydraulique, il est possible de calculer les paramètres d'un écoulement de fluide. De la même façon un diamètre hydraulique similaire peut être défini dans un milieu poreux. L'expression suivante est donc utilisé pour un ensemble de capillaires.

$$d_h = 4 \frac{\phi}{S(1-\phi)} \quad \text{III. 4}$$

### III. 2. La perméabilité.

Le diamètre hydraulique est ensuite utilisé dans l'équation suivante qui est la forme de base d'une équation de la perméabilité à calculée [9]. En supposant que le milieu poreux peut être décrit par un ensemble de petits capillaire la perméabilité est donnée par:

$$k = \frac{\phi}{16} \frac{\tau}{c_0} d_h^2 \quad \text{III. 5}$$

Où  $c_0$  est un facteur de forme sans dimension des capillaires. Le facteur de forme est introduit pour compenser la forme non sphérique des pores.  $c_0$  est généralement optimisé pour une classe donnée de matériaux poreux [10].

Après insertion du diamètre hydraulique dans l'équation précédente on obtient:

$$k = \frac{\phi^3}{S^2(1-\phi)^2} \frac{\tau}{c_0} \quad \text{III. 6}$$

Cet équation est connu sous le nom de l'équation de Kozeny-Carman.

En utilisant une valeur de  $c_0 = 2.5$  et une tortuosité  $\tau = 0.5$  l'équation suivante est obtenue:

$$k = \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \frac{d_m^2}{180} \quad \text{III. 7}$$

Ces valeurs sont généralement admises par beaucoup de chercheurs pour une distribution sphériques.

Cette équation peut être utilisée pour estimer la perméabilité d'un milieu poreux donné, en utilisant des propriétés comme la porosité et la taille moyenne des particules, qui sont généralement connues pour un milieu poreux donné. Il est important de souligner que cela est basé sur des données empiriques et devrait donc seulement être utilisé pour obtenir une estimation de la perméabilité. Pour obtenir une valeur exacte, il est nécessaire de conduire des expériences d'écoulement.

Pour notre cas on vas chercher les valeurs optimales reproduisant les mêmes résultats expérimentales. Cette méthode d'optimisation de ce modèle permet de trouver quelques paramètres difficile à mesurer à l'instar de la tortuosité et les facteurs de forme.

La perméabilité varie normalement de  $10^{-7}(\text{m}^2)$  dans les matériaux très perméables, tels que le sable gravier propre, à  $10^{-20}(\text{m}^2)$  dans les matériaux qui sont presque imperméables tel le béton.

#### III. 2. 1. Influence de la porosité.

La porosité influe considérablement la perméabilité. Vue la complexité du milieu poreux cette influence est par fois mal compris. Cela peut être exprimé par l'influence aussi de la tortuosité. Ce dernier paramètre est aussi une fonction de la porosité. On peut déduire donc que la porosité est un paramètre explicite puisque la porosité apparait directement dans l'expression de la perméabilité et en même temps un paramètre implicite puisqu'il entre dans le deuxième paramètres (la tortuosité ). La figure IV. 3 montre la variation de la perméabilité en fonction de la porosité en supposant que la tortuosité est constante.

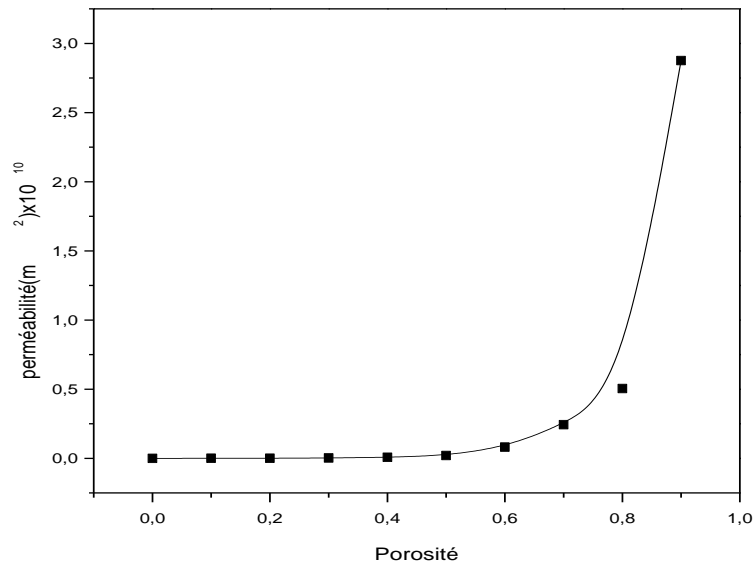


Fig. III. 3. Variation de la perméabilité en fonction de la porosité selon l'équation de Kozeny-Carman selon l'équation III. 6.

On peut remarquer que pour les matériaux poreux dont la porosité est inférieure à 0.60 la perméabilité varie lentement. Tandis que pour des valeurs plus grandes la perméabilité varie rapidement en fonction de la porosité. Bien sûr cette conclusion n'est pas toujours valable puisque la supposition que la tortuosité est constante n'est pas juste. Cependant pour des valeurs de porosité dans l'intervalle 0.4 et 0.6 les faits expérimentaux justifient l'invariance de tortuosité.

Plus de discussions sont effectuées dans la partie résultats et discussions de cette thèse.

# **Chapitre IV**

## ***Etude Expérimentale***

La mesure de la perméabilité à eau des matériaux poreux se fait généralement par la mesure du flux d'un fluide (de l'eau) en faisant varier la pression. Dans ce cas deux possibilités peuvent être envisagées. Le flux du fluide passe d'une façon frontale par rapport aux matériaux poreux. La deuxième situation, le fluide passe tangentiellement par rapport à la surface du matériau. A cause des considérations déjà discutées (Voir chapitre un) et l'utilisation ultérieure dans des applications techniques (filtration), c'est la deuxième cas qui a la préférence d'être utilisé ici.

Cependant le matériau doit être élaboré de telle façon sa forme doit être adaptée quant le matériau est sous forme.

### IV. 1. Origine du matériaux poreux

Le matériau est élaboré à partir du silice en ajoutant 30% de dolomite. Le mélange obtenu est fritté à 1300°C pendant une heure. La vitesse pour atteindre la température de frittage est 5 C°/min.

### IV. 2. Forme du matériau

A cause des complications techniques on ne peut pas donner une forme au matériau après le frittage. Une des principales causes est la fragilité de ces matériaux classés comme des céramiques techniques. Ainsi le matériau a été formé avant le frittage. La forme cylindrique (tubulaire) a été donnée par la technique d'extrusion. En faisant passer le matériau, sous forme de pâte dans un moule le matériau est récupéré dans une forme représentant la forme du moule. La figure IV. 1 illustre la forme géométrique utilisée dans les expériences de la perméabilité.

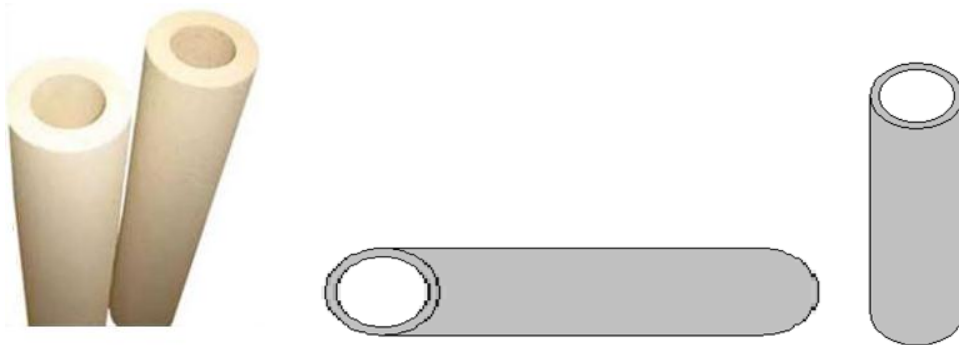


Fig. IV. 1. Forme tubulaire du matériau poreux élaboré à base de silice et 30% dolomite, fritté à 1300 C° pendant une heure.

Le tableau IV. 1 résume les caractéristiques géométriques de la forme tubulaire du matériau poreux élaboré.

Tableau IV. 1. Les caractéristiques géométriques du matériau poreux élaboré par extrusion.

caractéristique	épaisseur	diamètre interne	diamètre externe	longueur
valeur	2 mm	2.7mm	4.7mm	15-20cm

### IV. 3. Protocole expérimentale.

Le fluide utilisé est l'eau distillée, un réservoir de 10L est utilisé ( généralement remplis ) afin de permettre une bonne approvisionnement du fluide. La pompe véhicule le fluide vers le matériaux avec différent pressions à l'aide d'un système de contrôle électronique. Le perméat est récupéré par un bicher pour la mesure du volume de fluide passant par le matériau poreux.

Le volume est mesuré chaque cinq minute jusqu'à obtenir la saturation. La figure IV. 2 donne un aperçu de la dispositif expérimentale utilisé pour la mesure de la perméabilité d'un matériau poreux.

Le matériau sous sa forme tubulaire est couverte dans une capsule permettant de lui protéger et en même temps servant comme un système de collection pour l'eau passant.

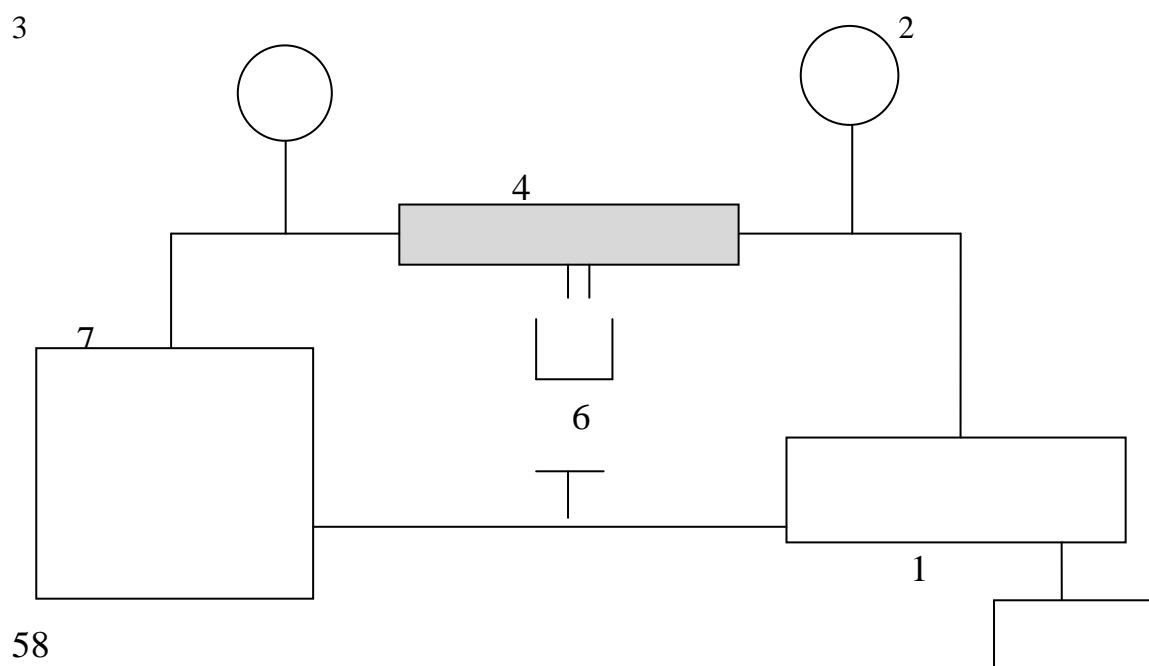


Fig. IV. 2 : Dispositif expérimentale pour la mesure de la perméabilité.

Les différentes composantes de ce dispositif sont:

1. Pompe
2. Manomètre  $p_{in}$
3. Manomètre  $p_{out}$
4. Matériau sous forme tubulaire
5. Réservoir du fluide
6. Robinet d'arrêt
7. Bicher de récupération
8. Système pour contrôler la pompe

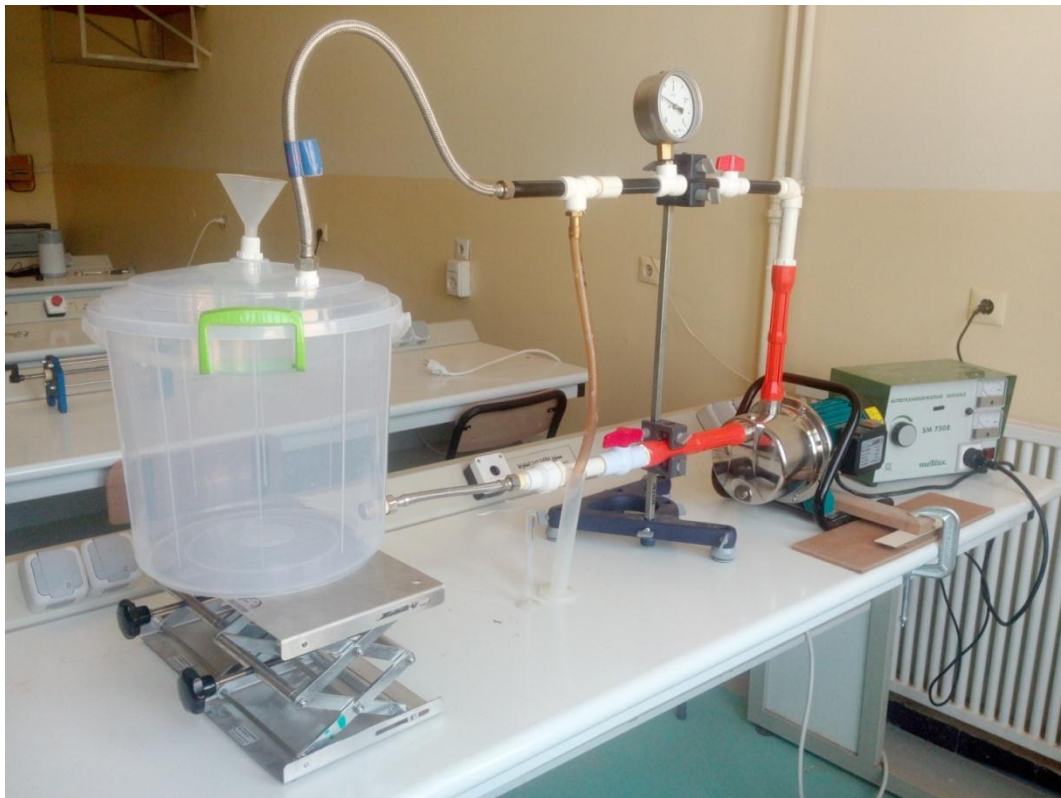


Fig. IV. 3: L'équipement expérimental pour la mesure de la perméabilité dans le laboratoire de physique.

Les manomètres utilisés pour mesurer la pression sont monté en amont et en aval de du matériau poreux. La figure IV. 3. illustre les graduations d'un manomètre monté dans cet expérience.



Fig. IV. 4. Type de manomètre utilisé pour mesurer les pression en bar.

Afin d'utiliser les manomètres dans les meilleurs conditions il est recommandé de commencer par les expérience où les pressions sont petites. Pour les expérience où les pressions sont un peu élevées on doit augmenter progressivement leurs valeurs jusqu'à obtenir la valeur fixée.

### IV. 3. 1. Calcul du flux.

Afin d'obtenir la saturation nous devons mesurer le flux de l'eau traversant le matériau poreux en fonction du temps. Cette tâche nécessite la fixation d'un intervalle de temps permettant la réalisation d'au moins une mesure. La valeur de 5 min apparait raisonnable. Elle permet la réalisation de 12 expériences pendant une heure pour chaque pression.

Le flux de l'eau à travers le matériaux poreux est mesuré à l'aide de la formule suivante:

$$Flux = \frac{Q}{S.t} \quad \text{IV. 1}$$

Où  $Q$  : la quantité volumique du fluide traversant le matériau poreux pendant le temps  $t$

$S$  : la surface interne du matériaux sous sa forme tubulaire.  $S = 2\pi rl = 2.54 \times 10^{-3} m^2$

Si on fixe le volume à mesurer (40ml par exemple ) et on mesure le temps de récupération de ce volume on peut calculer le flux passant par le matériau poreux. Le tableau IV. 2 montre un exemple de résultat pour une valeur de pression  $p=0.2$  bar.

*Tableau IV. 2.* Les résultat d'une expérience de mesure de la perméabilité pour une pression de 0.2 bar.

t(min)	t(s)	Flux ( $l/m^2h$ )
0	12.37	4454.53
5	13.28	4263.33
10	12.61	4159.96
15	14.26	3970.34
20	15.27	3967.56
25	15.28	3705.30
30	15.20	3724.31
35	15.66	3615.39
40	16.28	3477.71
45	16.75	3380.12
50	19.06	2970.46

Pour obtenir la perméabilité on doit répéter cet expérience pour différentes valeurs de pression. Les valeurs  $p= 0.4$  bar et  $p=0.6$  bar ont été choisie pour obtenir un courbe linéaire.

#### **IV. 4. Mesure de la porosité.**

La porosité est généralement le paramètre le plus simple à mesurer. On a décrit dans le chapitre un les différente méthode d'estimation de ce paramètre. Une estimation préliminaire donnant une valeur pratiquement utilisable est montrée dans la figure IV. 3. Elle est estimée par la simple expérience consistant à mesurer le volume d'un échantillon du matériau  $V_1$ . Cette échantillon est plongé dans un fluide (eau distillé ou Kérosène par exemple ), le volume supplémentaire  $V_2$  du fluide est mesuré.

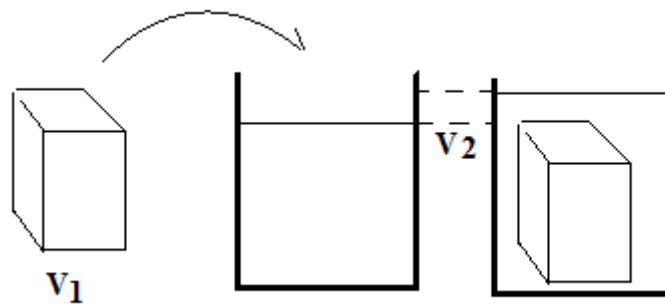


Fig. IV. 5. Mesure de la porosité par une simple expérience.

La porosité est alors donnée par la formule:

$$\phi = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad \text{IV. 2.}$$

Après conduction de plusieurs expériences on a trouvé une valeur de  $\phi = 46\%$ .

#### **IV. 5. Mesure des rayons des pores**

La forme des pores, leur distribution ainsi que leurs diamètre peuvent être mesuré par la microscopie électronique a balayage MEB. Cette technique de la microscopie est généralement très pratique. Les résultats des donnés exactes de la microstructure par cette technique sert généralement à valider les résultats des modèles théoriques et donne une certaine confiance pour d'autres mesures à l'instar de la porosité mesurée par des méthodes simples. Pour notre cas on utilise cette technique pour mesurer le rayon moyen des pores en premier lieu. D'autre par on l'utilise pour étudier la microstructure dont le caractère principale est sa nature poreuse.

IV. 5. 1. Principe de la technique.

L'image MEB est une image reconstituée : une sonde, le faisceau d'électrons, balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone un signal induit par cette sonde pour en former une image, cartographie de l'intensité de ce signal.

Le MEB est constitué d'une source d'électrons qu'un jeu de lentilles "condenseur" focalise sur un diaphragme. Une deuxième lentille "objectif" refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin ( $<15$  à  $200 \text{ \AA}$ ). Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon. Ceci forme la sonde. La figure IV. 4 donne un image de l'appareil MEB ainsi que ses composant.

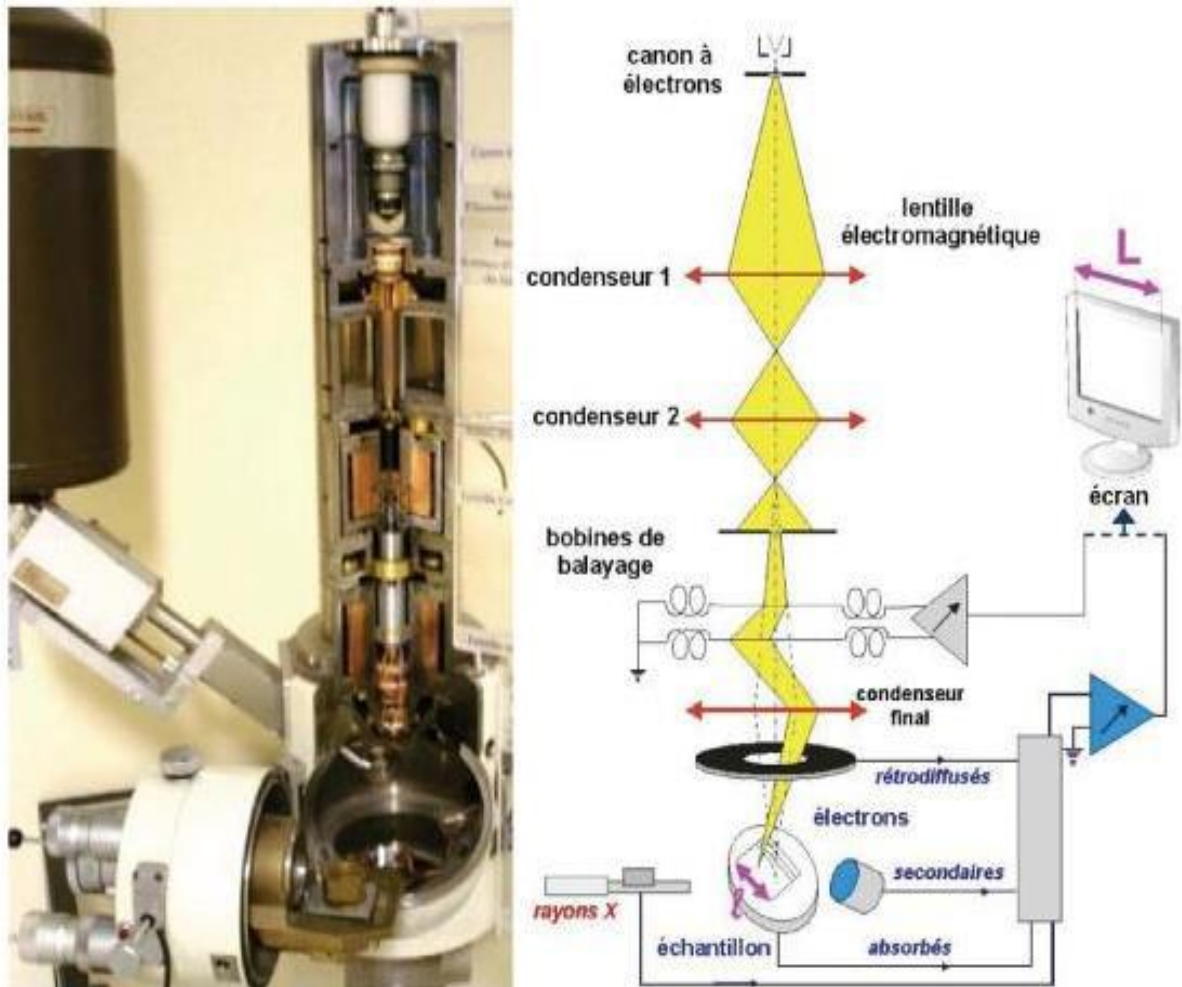


Fig. IV. 6. Image d'un appareil MEB ainsi que la schématisation de ses composants.

Sous l'impact du faisceau d'électrons, il y a apparitions de plusieurs phénomènes :

1. rétrodiffusion d'électrons du faisceau incident avec plus ou moins de perte d'énergie.
2. émission d'électrons secondaires de faible énergie, provenant des couches externes des atomes de l'échantillon .
3. émission de rayons X avec les électrons Auger;
4. émission de photons généralement UV-visible,

### IV. 5. 2. Fonctions principales

On résume les définitions des principales fonctions d'un microscope électronique à balayage comme: le balayage, le grandissement et le contraste.

**Balayage:** Il permet de modifier la vitesse de balayage du faisceau d'électrons. Logiquement, si la vitesse est plus rapide, alors la définition de l'image est moins importante et un bruit apparaît petit à petit .

**Le grandissement:** Cette grandeur obtenu dans un MEB est donné par le rapport de la longueur  $L$  de la ligne de balayage horizontale de l'écran ( $L$  étant une grandeur fixe) à la longueur  $l$  de la ligne horizontale balayée par le faisceau d'électrons primaire sur l'échantillon( $l$  étant variable).

**Le contraste:** C'est la variation locale de l'émission électronique. Le contraste de l'image provient d'effets topographiques, chimiques et structuraux, régissant la rétrodiffusion et l'émission secondaire.

### IV. 5. 3. Images obtenus.

On a obtenu divers image de l'échantillon du matériau poreux avec divers grandissements. A partir de l'analyse de ces images on peut déduire beaucoup d'informations sur la microstructure du matériau poreux utilisé. La première information est la structure poreuse elle même du matériau. La deuxième est la distribution des pores dans cette microstructure et dont l'existence des pores petites et grandes. La troisième concerne le rayon moyenne des pores.

La figure IV. 7 donne un image typique de la microstructure du matériau. On peut dire qu' après l'analyse de la microstructure le rayon moyen des pores de ce matériau est estimé à environ  $7\mu m$ .

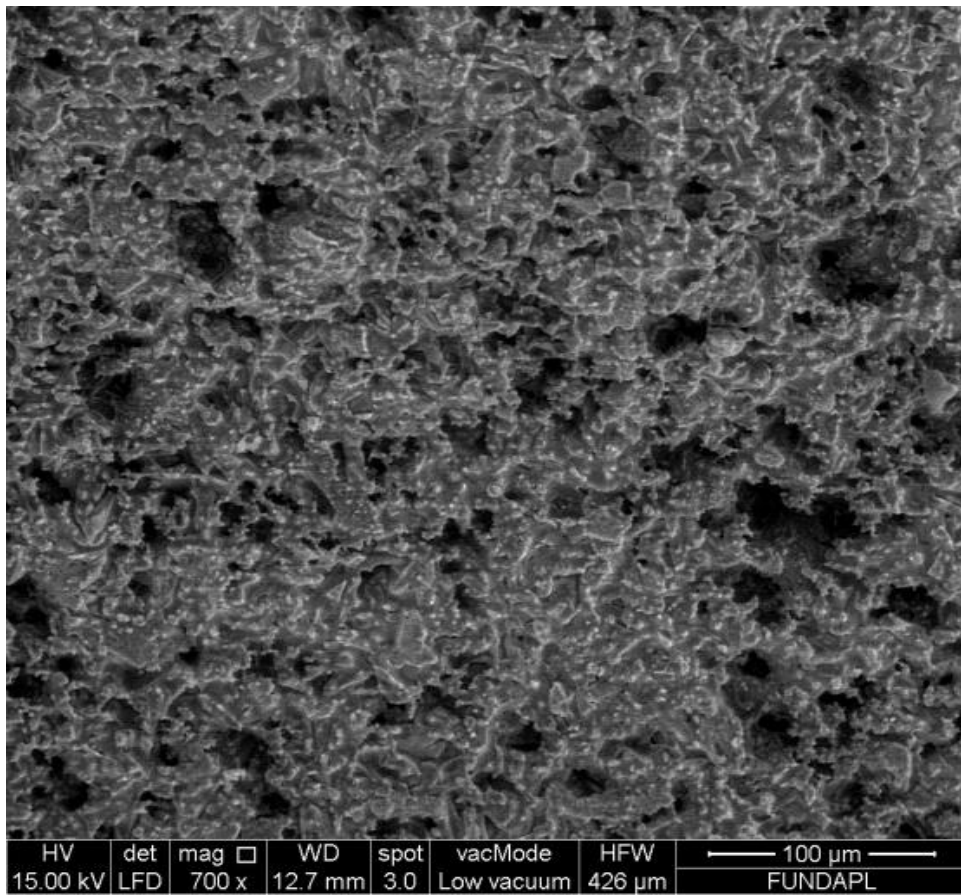


Fig. IV. 7. Image MEB du matériau poreux utilisé dans les expérience de la perméabilité.

# **Chapitre V**

## ***Résultat et Discussions***

Les résultats des expériences sont présentés et discutés dans ce chapitre. Ces résultats expérimentaux sont utilisés afin de caractériser le matériau poreux et en même temps de valider le modèle théorique hydrodynamique dite de Darcy. Une fois la linéarité dans ce modèle est obtenue la perméabilité peut être déduite expérimentalement. Le modèle de Kozeny-Carman est utilisé pour déduire la perméabilité en utilisant les caractéristiques du matériau poreux. La porosité, un paramètre facile à mesurer, a été utilisé comme un paramètre argument. Le diamètre des pores sont déduite à partir des images obtenues de la microscopie électronique à balayage (MEB). Cependant, la tortuosité et le paramètre géométrique ont été optimisés.

### **V .1. Représentations des Résultats expérimentales.**

#### **V .1. 1.Le flux de saturation.**

Le tableau V.1 montre la variation du flux de l'eau dans le matériau poreux en fonction du temps pour une pression de 0.6 bar. Les valeurs du flux sont calculés en utilisant l'expression IV. 1.

*Tableau V. 1. Variation du flux en fonction du temps pour une pression de 0.6 bar.*

P=0.6 bar		
t(min)	$t_0$	$\Phi$
0	4.15	13642.68
5	4.25	13321.6470
10	4.51	12553.6585
15	4.42	12809.2760
20	4.81	11770.6860
25	4.85	11673.6082
30	5.2	10887.8846
35	5.24	10804.7709
40	5.24	10804.7709
45	5.26	10763.6882
50	5.15	10993.5922

Afin de pouvoir analyser les résultats de l'allure de la variation du flux en fonction du temps on a dessiné le graphe de la figure V. 1.

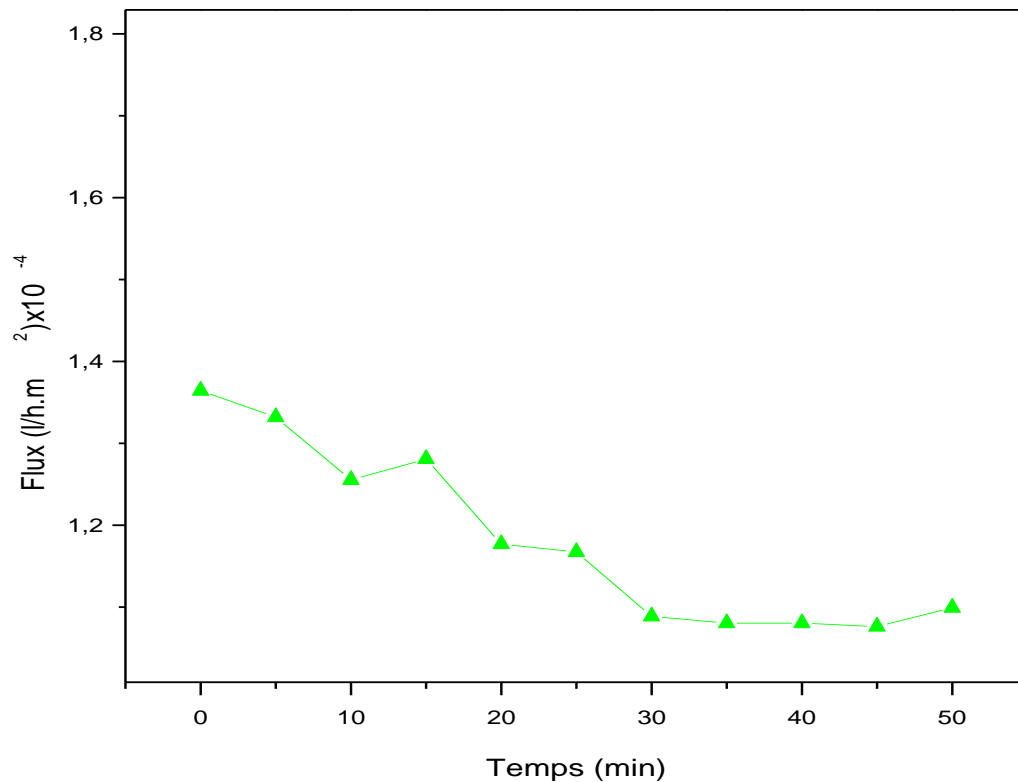


Fig. V .1: La variation du flux en fonction de temps pour une pression de 0.6 bar.

On peut remarquer que le flux de l'eau diminue progressivement jusqu'à une valeur dite le flux de saturation. Après une variation transitoire le flux atteint cette valeur qui caractérise la permanence et la stabilité de l'écoulement du fluide dans le matériau poreux.

### V. 1. 2. Variation de flux de saturation.

Afin d'étudier la variation du flux de saturation en fonction de la pression on a répété l'expérience pour différentes pressions. Le tableau V. 2 montre les résultats pour les valeurs de pressions:  $p = 0.2$  , 0.4 et 0.6 bar

Tableau V. 2. Variation de flux en fonction de temps et de pression.

P(bar)	P=0.2		P=0.4		P=0.6	
t(min)	$t_0$	$\Phi$	$t_0$	$\Phi$	$t_0$	$\Phi$
0	12.37	4454.53423	6.61	8565.37519	4.15	13642.68
5	13.28	4263.3381	7.97	7103.78043	4.25	13321.6470
10	12.61	4159.96547	8.21	6896.11815	4.51	12553.6585

## V. Résultats et discussion

15	14.26	3970.34572	8.74	6477.93349	4.42	12809.2760
20	15.27	3967.56342	9.24	6127.39502	4.81	11770.6860
25	15.28	3705.30955	8.84	6404.65372	4.85	11673.6082
30	15.20	3724.81118	9.20	6325.93631	5.20	10887.8846
35	15.66	3615.39783	8.95	5633.54527	5.24	10804.7709
40	16.28	3477.71069	10.05	5800.93	5.24	10804.7709
45	16.75	3380.12716	9.76	5300.93545	5.26	10763.6882
50	19.06	2970.46853	9.87	5736.2847	5.15	10993.5922

Pour mieux voir la variation de flux de saturation en fonction de pression on a dessiné le graphe de la figure V. 2. Ce graphe montre clairement qu'après certain temps le flux se fixe en atteignant un état de saturation pour les différentes valeurs de pression utilisées.

On peut remarquer que le flux de saturation varie en fonction de la pression. Il augmente au fur et à mesure que la pression augmente. Pour analyser la nature de cette variation nous devons dessiner la variation de flux de saturation en fonction de la pression dans un graphe.

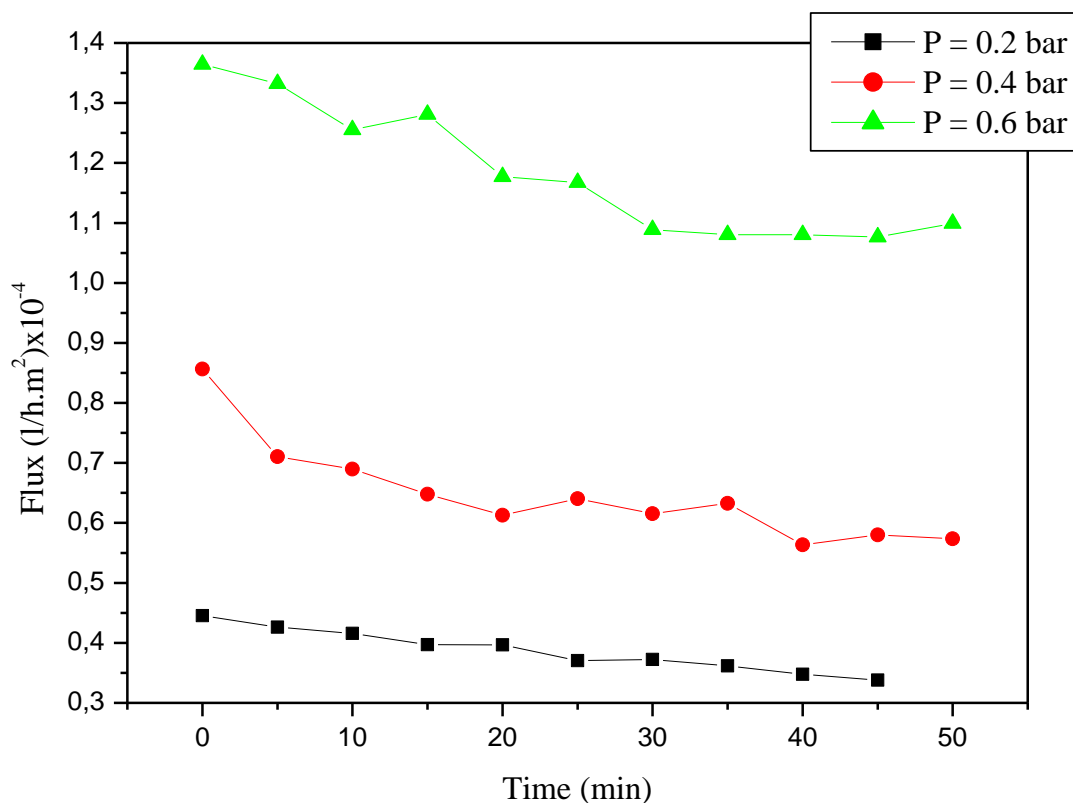


Fig. V. 2. Variation de flux en fonction du temps pour différentes valeurs de pressions

### V. 3. La loi de Darcy.

Comme décrit dans les chapitres précédents, on s'attendait à ce que le flux dans le matériau étudié obéisse à la loi de Darcy. Si une relation linéaire est établie, il sera possible de calculer le perméabilité .

Cette grandeur est déduite à partir du graphe de la variation de flux de saturation en fonction de pression en mesurant la pente de la courbe. Le tableau V. 3. résume les résultats obtenus précédemment.

Tableau V.3. Variation de flux de saturation en fonction de pression.

Flux	0	13500	22230	30730
pression	0	0.2	0.4	06

Le graphe de la figure V. 3. indique la variation linéaire de flux de saturation en fonction des pression appliquées. Une relation linéaire est une démonstration que le comportement de fluide dans le matériau poreux est régi par la loi de Darcy.

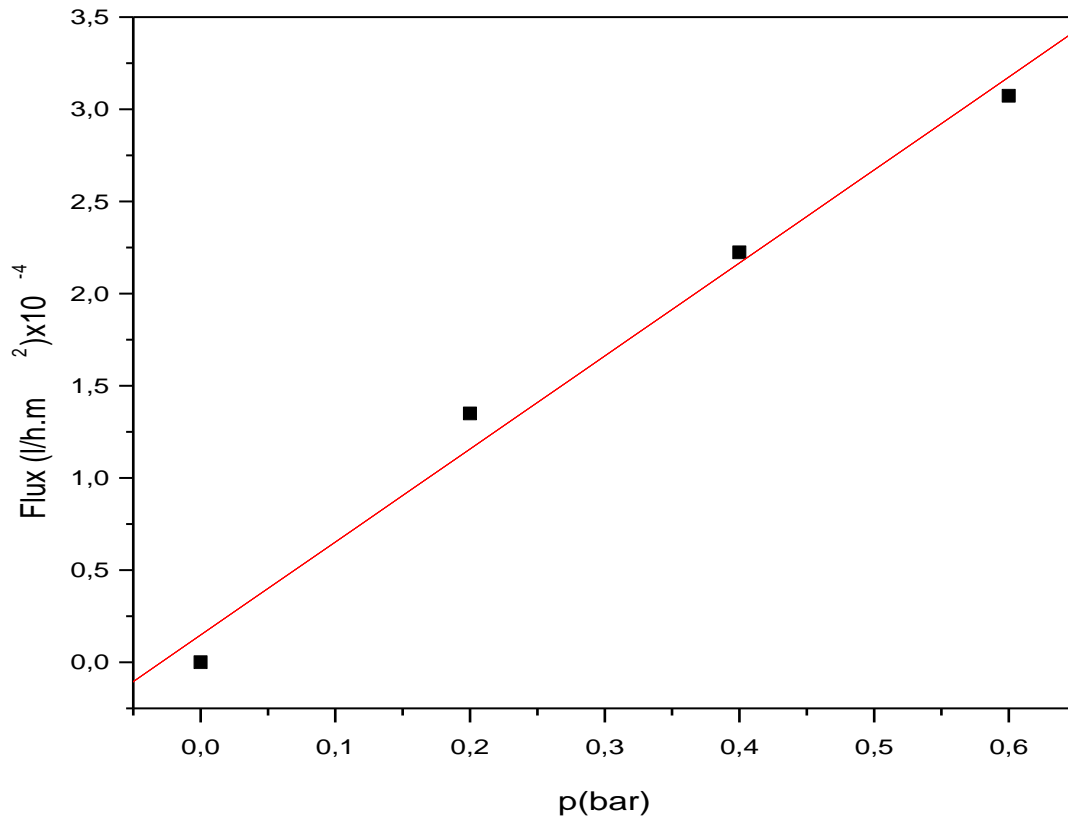


Fig. V. 3. Variation de flux de saturation en fonction de pression.

Les résultats des expériences ont indiqués, comme prévu, que la relation entre le flux de saturation dans le matériaux poreux étudié et le gradient de pression appliqué est linéaire. Il est ainsi possible de calculer la perméabilité à partir de la pente de la courbe de Darcy.

$$Y = A + B * X$$

$$A=1477$$

$$B=50460$$

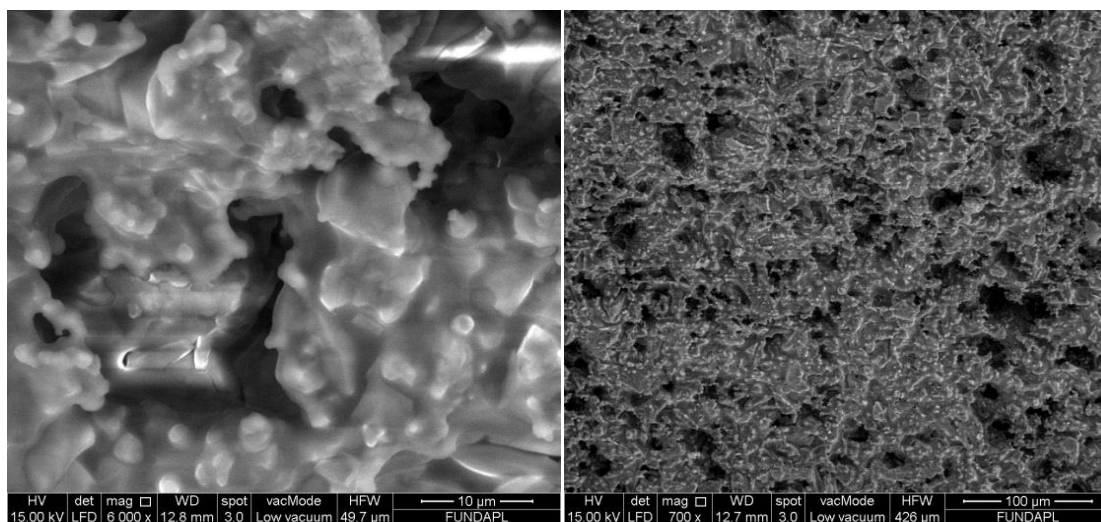
$$R=0.99$$

$$B= K(\text{expérimentale})=50460 (l / h.m^2) = 1.27 \cdot 10^{-12} m^2$$

#### V. 4. Microscope électronique.

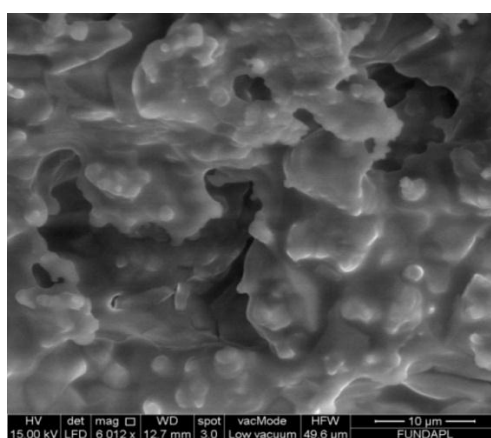
Le matériau poreux utilisé dans ces expériences sous forme tubulaire a une distribution de pores. En générale cette distribution suit une loi normale dite aussi Gaussienne. Les images de MEB montrent clairement la microstructure poreuse de ce matériau. Il est clair l'existence des pores de différentes tailles prouvant l'existence de la distribution normale des pores. Par exemple la figure V. 4. a illustre un pore dont la taille est estimée de  $3.25 \mu\text{m}$ .

La figure V. 4. b illustre une distribution homogène avec des pores dont la taille variant entre :  $2.0$  et  $12 \mu\text{m}$ . Une estimation appropriée de la valeur moyenne des rayons de pores peut être trouvée est la valeur  $7.0 \mu\text{m}$  apparaît très raisonnable.



a) Image des pores  $d_m = 3.253 \mu\text{m}$

b) Image des pores  $3.0 - 12 \mu\text{m}$



c) Image de pore de  $11 \mu\text{m}$ .

Fig. V. 4. Les images MEB de différents agrandissements.

### **V. 5. Résultats du modèle Kozeny-Carman.**

En incorporant les valeurs de la porosité et le rayon des pores dans la formule de Kozeny-Carman on peut optimiser le facteur de forme. La tortuosité est supposé constante. On obtient les valeurs de la perméabilité avec  $c_0 = 0.715$ .

En fin on peut résumer les caractéristiques du matériau poreux:

- La porosité:

$$\phi = 0.46$$

- Le rayon moyen des pores:

$$r_p = 7 \mu m$$

- Tortuosité:

$$\tau = 0.5$$

- Le facteur géométrique est calculé par optimisation on a obtenu:

$$c_0 = 0.715$$

- La perméabilité

$$k = 50460 (l / h.m^2) = 1.27 \cdot 10^{-12} m^2$$

# *Conclusion*

La perméabilité à eau d'un matériau céramique poreux élaboré à partir de matériaux brutes locales (dolomite et silice) a été étudié. Cette étude est divisé en deux parties. la première partie consiste a trouver une relation entre la perméabilité et les différentes paramètres de la microstructure. Tandis que la deuxième consiste à réaliser une étude expérimentale qui a abouti à mesurer la perméabilité par un dispositif de flux tangentiel.

Pour mener à bien les expériences de la perméabilité ainsi que pour fonder une base théorique permettant d'expliquer les résultats obtenus on a étudié le modèle hydrodynamique de transport des fluide dans un milieu poreux. Ce modèle nous permet de prouver l'existence de la loi de Darcy pour un système 1D et 2D. On a utilisé la même configuration tubulaire dans le modèle hydrodynamique et dans les expérience de mesure de la perméabilité. La variation linéaire du flux en fonction des pression appliquées est exploitée pour monter un dispositif expérimentale permettant la mesure de la perméabilité.

Les divers propriétés des matériaux céramiques poreux dépendent largement de la microstructure. La perméabilité à eau doit donc lui dépendre. Les caractéristiques fondamentales de cette microstructure sont: la porosité, dimension des pores, morphologie, est distribution des pores.

La perméabilité dépend explicitement et implicitement de ces paramètres. On a utilisé le modèle de Kozeny-Carman pour pouvoir exploiter cet dépendance. La porosité et la tortuosité deux paramètre influençant considérablement la perméabilité figure dans la formule dite de Kozeny-Carman. La morphologie des pores est introduite via le facteur géométrique dont le calcul est le plus difficile. Dans notre thèse la porosité a été mesuré par une simple expérience. on a trouvé une valeur de 0.46. Cependant la mesure de rayons des pores a nécessité l'utilisation de le microscope électronique à balayage (MEB). Les valeurs obtenues sont de l'ordre de micromètre. L'incorporation de ces paramètres dans l'expression de la perméabilité nous permet de l'estimer. Cette expression est limité par l'utilisant des données expérimentelles, ce qui nous a obligé à optimiser le paramètre géométrique.

Consternant la partie expérimentale, la courbe de flux en fonction de pression est complètement linéaire. Cette linéarité nous a permis de trouver la perméabilité. Les valeur obtenues sont très satisfaisant si on les compare avec d'autre utilisées dans l'industrie ou publiées dans les revues.

Il est important de signaler que cette étude a été faite dans le but de trouver la perméabilité à eau d'un matériau poreux. Une étude plus complète doit être faite dans le but de caractériser complètement le matériau céramique poreux. Cette étude comprend obligatoirement les propriétés mécaniques et physicochimiques. C'est ces propriétés ainsi que la perméabilité qui vont trancher quant à l'utilisation de ces matériaux dans les divers applications industriels.

*Références  
bibliographiques*

- [1]: M. M. Tomadakis and S. V. Sotirchos, Transport properties of random arrays of freely overlapping cylinders with various orientation distributions, *The Journal of Chemical Physics*, vol. 98, no. 1, p. 616, 1993.
- [2]: D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 176, no.1, p. 379, 1987.
- [3]: Y. Champoux and J.-F. Allard, Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, *Journal of Applied Physics*, vol. 70, no. 4, p. 1975, 1991.
- [4]: Jacob Bear, Dynamics of fluids in porous media, *American Elsevier Publishing Company*, New York, 1972.
- [5]: F. A. L. Dullien, Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure, *Academic Press Inc.*, New York, 1979.
- [6]: A. J. Burggraf and L. Cot, Fundamentals of Inorganic Membrane Science and Technology, Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1996.
- [7]: Frank M. White , Viscous Fluid Flow, *McGraw-Hill Book Co.*, Singapore, 1999.
- [8]: Fand ,R. M., Resistance to the Flow of Fluids Through Simple and Complex Porous Media Whose Matrices Are Composed of Randomly Packed Spheres, ASME, *J. Fluids Eng.*, vol. 109, pp. 268-274, 1987.
- [ 9]: Theodoor Wouter Fens, Small Rock Samples Using Image Analysis Techniques, *Delft University Press*, Stevinweg 1, Netherlands, 2000.
- [10]: Flow in Porous Media I: A Theoretical Derivation of Darcy's Law, *Journal Transport in Porous Media*, Publisher Springer Netherlands, vol.1, no. 1, pp. 3-25, 1986.

## ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة نفاذية المياه لمادة خزفية مسامية ، المادة مصنوعة من السيليس بإضافة 30% من الدولوميت. وقد تم ذلك بقياس تدفق السائل(الماء) المار عبر المادة المسامية عن طريق تغيير الضغط . لقد تم العثور على أنه يمكن وصف التدفق بقانون دارسي لأن العلاقة بين تدفق التشبع وتدرج الضغط المطبق خطية. في هذه الحالة تمكننا من استنتاج النفاذية تجريبيا. وباستخدام نموذج الهيدروديناميكا استطعنا إثبات وجود نموذج دارسي. و استنادا لنموذج كوزني و كارمان تمكننا من استنتاج النفاذية باستخدام خصائص المادة المسامية .

**الكلمات المفتاحية:** المواد الفراغية, النفاذية, الفراغية, التعرج, قانون دارسي, نموذج الهيدروديناميكا, نموذج كوزني و كارمان.

## **Résumé:**

Ce travail consiste à étudier la perméabilité à eau d'un matériau céramique poreux préparé à base de silice plus 30% dolomite. On a utilisé deux modèles. Le premier est le modèle hydrodynamique dont l'utilisation a permis de démontrer l'existence du régime de Darcy. Le deuxième est le modèle de Kozeny-Carman permettant de relier la perméabilité à la porosité, tortuosité et les paramètres géométriques. La perméabilité a été mesurée expérimentalement et les résultats expérimentaux se concordent avec les différents modèles.

**Mots Clés:** Matériaux poreux, perméabilité, porosité, tortuosité, loi de Darcy, modèle hydrodynamique, modèle de Kozeny-Carman.

## **Abstract:**

The permeability of a ceramic porous material prepared with silica and 30% dolomite has been studied. Two models have been used. The first one is the hydrodynamic model where the existence of Darcy law has been proved. The second one is the Kozeny-Carman model where the relationship between the permeability and the different parameters has been explicated. The permeability has been measured with the same time as the porosity and the mean pore size.

**Key words:** Porous Materials, permeability, porosity, tortuosity, Darcy law, hydrodynamic model, Kozeny-Carman model.