

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Réf:.....

Filière : Génie Mécanique

Option : Energétique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

Thème

Simulation numérique en 2D d'un écoulement turbulent traversant une conduite partiellement remplie par un milieu poreux

Présenté par :

Mr : REFRAFI Mohamed Abderaouf

Proposé et dirigé par :

Dr. BECHIRI Mohammed
Pr. BELGHAR Nouredine

Promotion : 2021/2022

Dédicace

***Je dédie ce modeste travail à mes parents, que dieu
me les garde pour toujours.***

À mes sœurs et frères.

***A toute la famille de département de génie
mécanique.***

Remerciements

Louange à Allah, celui qui m'a illuminé le chemin de la science et m'a accordé pour accomplir ce travail.

J'adresse tout d'abord mes remerciements les plus sincères au

Dr. BECHIRI Mohammed et au Pr. BELGHAR Noureddine, qui ont accepté de plein gré d'être les directeurs de ce travail. Leur grande Connaissance dans le domaine, ainsi que leur expérience scientifique, ont joué un rôle important dans la conception de ce travail.

Enfin, j'aimerais aussi remercier mes chers amis, collègues et tous ceux et celles qui nous ont aidé de près et de loin afin de réaliser ce travail.

Résumé

L'étude présentée dans ce projet de fin d'étude concerne la simulation numérique en 2D d'un écoulement turbulent traversant une conduite partiellement rempli par un milieu poreux. L'objectif de ce mémoire est d'élaborer une méthode efficace pour le calcul des deux constantes de n'importe quel milieu poreux dont la géométrie (la structure des pores) n'est pas assez compliquée. La méthode est cent pour cent basée sur la simulation numérique de l'écoulement à travers le milieu poreux considéré. Dans la plupart des codes du calcul numérique (CFD codes), les constantes intrinsèques du milieu poreux sont dépendante de la perméabilité, bien que la porosité affecte sa conductivité thermique.

Mots clés : Milieu poreux, constantes des milieux poreux, écoulement turbulent, simulation numérique.

ملخص

تتعلق الدراسة المقدمة في مشروع نهاية الدراسة هذا بالمحاكاة الرقمية ثنائية الأبعاد لتدفق مضطرب يعبر أنبوبًا مملوء جزئيًا بوسط مسامي. الهدف من هذه المذكرة هو التوصل إلى طريقة فعالة لحساب ثابتين لأي وسيط مسامي لا تكون هندسته (بنية المسام) معقدة بدرجة كافية. تعتمد الطريقة مائة بالمائة على المحاكاة العددية للتدفق عبر الوسط المسامي قيد الدراسة. في معظم برامج الحساب الرقمية (رموز CFD)، تعتمد الثوابت الجوهرية للوسط المسامي على النفاذية، على الرغم من أن المسامية تؤثر على التوصيل الحراري.

الكلمات المفتاحية: الوسط المسامي، ثوابت الوسائط المسامية، التدفق المضطرب، المحاكاة العددية.

Liste des figures

Figure 1.1	Représentation schématique du modèle physique (Alkam et al, 2001).	9
Figure 1.2	Représentation schématique du modèle physique (Chikh et al, 1997).	10
Figure 1.3	Cellules hexagonales obtenues dans des conditions similaires à celles de Bénard observées par Koschmieder et Pallas.	11
Figure 2.1	Milieux poreux consolidés.	12
Figure 2.2	Milieu poreux non consolidé.	13
Figure 2.3	Volume Elémentaire Représentatif (V.E.R).	15
Figure 2.4	Milieu poreux.	18
Figure 2.5	Les termes sources.	19
Figure 2.6	Termes source.	20
Figure 3. 1a	Première configuration à étudier, milieu poreux effectif.	23
Figure 3. 1b	Deuxième configuration à étudier, milieu poreux fictif.	24
Figure 3.2a	Conditions aux limites, 1er cas : milieu poreux effectif.	26
Figure 3.2b	Conditions aux limites, 2ième cas : milieu poreux fictif.	26
Figure 3.3a	Maillage du domaine du calcul, 1er cas : milieu poreux effectif.	27
Figure 3.3b	Maillage du domaine du calcul, 2ième cas : milieu poreux fictif.	27
Figure 3.4a	Test de maillage pour la première configuration, évolution des résidus maximaux en fonction de Δl_{max} .	28
Figure 3.4b	Test de maillage pour la première configuration, évolution de la différence de pression en fonction de N.	29
Figure 3.4c	Test de maillage pour la deuxième configuration, évolution de la différence de pression en fonction de Δl_{max} .	30
Figure 3.5a	Contour de pression pour différentes vitesses d'entrée.	34
Figure 3.5b	Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée.	35
Figure 3.5c	Evolution de la chute de pression en fonction de la vitesse d'entrée.	36

Figure 3.6a	Contour de pression pour différentes vitesses d'entrée, première configuration.	37
Figure 3.6b	Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée.	38
Figure 3.6c	Lignes du courant coloré par le contour des vitesses pour différentes vitesses d'entrée.	39
Figure 3.6d	Evolution du gradient de pression en fonction de la vitesse d'entrée.	40
Figure 3.7a	Contours de pression et de vitesse pour $V_0 = 50$ m/s, deuxième configuration.	41
Figure 3.7b	Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée, deuxième configuration.	42
Figure 3.7c	Comparaison de la chute de pression résultante des deux configurations.	43
Figure 3.7d	Evolution de l'erreur relative et l'erreur absolue sur la ΔP en fonction de V_0 .	43
Figure 3.8a	Contours de température pour différentes vitesses, $\Phi_0 = 10$ MW/m ³ , première configuration.	44
Figure 3.8b	Variation de la température de sortie en fonction de la vitesse d'entrée, $\Phi_0 = 10$ MW/m ³ , première configuration.	45
Figure 3.9a	Contours de température pour différentes vitesses, $\Phi_0 = 4.5$ MW/m ³ , deuxième configuration.	46
Figure 3.9b	Comparaison de température de sortie résultante des deux configurations.	47

Liste des tableaux

Table. 3.1	Propriété thermo-physiques des matériaux utilisés.	25
Table. 3.2	Les conditions aux limites.	25

Nomenclature

A_s	Surface spécifique	$[m^{-1}]$
S, A	Surface interne du pore	$[m^2]$
C	Coefficient inertiel	$[-]$
V	Composant de volume	$[m^3]$
u, v	Composantes de vitesse	$[m/s]$
T	La température	$[K]$
K	La perméabilité	$[m^2]$
D	Diamètre	$[m]$
L_e	Longueur réelle des lignes de courant du fluide	$[m]$
L	Longueur	$[m]$
P	pression	$[Pa]$
Δp	La chute de pression	$[Pa]$
F	La force	$[N],$ $[Kg.m/s^2]$
s	Terme source	$[Kg/m^2 . s^2]$
C_1/t	Coefficient par l'épaisseur	$[kg/m^3]$
C_2/t	Coefficient par l'épaisseur	$[1/m]$
t	L'épaisseur	$[m]$
C_p	Capacité thermique	$[J/Kg.K]$
k	Conductivité thermique	$[W/m.K]$
H_{eq}	Diamètre équivalent	$[m]$
H	Largeur du canal	$[m]$
x	Coordonnée axiale	$[m]$

y	Coordonnée transversale	[m]
-----	-------------------------	-----

Symboles Grecques

μ	La viscosité dynamique	[Kg/m .s]
-------	------------------------	-----------

ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
--------	-----------------	----------------------

φ , ε	La porosité	[-]
-------------------------	-------------	-----

τ	La tortuosité	[-]
--------	---------------	-----

α	La perméabilité	[m ²]
----------	-----------------	-------------------

Sommaire

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction	1
Chapitre N° 1 : Recherche Bibliographique	
1. Recherche Bibliographique	3
Chapitre N° 2 : Généralité sur les Milieux Poreux	
1.1. Milieux poreux	12
1.1.1. Définition	12
1.1.2. Caractéristiques des milieux poreux	13
1.1.2.1. Porosité	13
1.1.2.2. Perméabilité	14
1.1.2.3. Volume élémentaire représentatif (V.E.R)	14
1.1.2.4. La tortuosité	15
1.1.2.5. Surface spécifique	16
1.2. Lois appliquées dans les milieux poreux	17
1.2.1. Loi de Darcy généralisée	17
1.2.2. Modèle de Darcy – Forchheimer	17
1.2.3. Modèle de Darcy – Brinkman	17
1.3. Modélisation des milieux poreux	18
1.3.1. La chute de pression	19
1.3.2. Les équations de Navier-Stokes	19
1.3.3. Terme source	19
1.4. Loi de darcy	21
1.5. Calcul des coefficients	22

Chapitre N° 3 : Simulation Numérique

3.1. Introduction	23
3.2. Modèles physiques	23
3.3. Conditions aux limites	25
3.4. Génération du maillage	26
3.5. Test de maillage	27
3.6. Formulation Mathématique	30
3.7. Résultats et discussions	31
3.7.1. Ecoulement sans milieu poreux	34
3.7.2. Ecoulement avec milieu poreux effectif	36
3.7.3. Ecoulement avec milieu poreux fictif	40
3.7.4. Milieu poreux effectif avec source de chaleur	44
3.7.5. Milieu poreux fictif avec source de chaleur	45
Conclusion	47
Références	48

Introduction

Les écoulements à travers les milieux poreux représentent un domaine d'intérêt pratique très connu. Les problèmes d'hydraulique souterraine, l'exploitation des gisements pétroliers, l'industrie chimique ou les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent quelques exemples d'applications. Pour bien comprendre les phénomènes qui ont lieu, il faut d'abord avoir les bons modèles. La complexité géométrique d'un milieu poreux, où on a des pores de dimensions et de formes très différentes, mais qui permettent l'écoulement d'un ou plusieurs fluides, rend dès le début le problème de la modélisation de l'écoulement difficile. En commençant par la loi de Darcy, qui décrit au niveau macroscopique l'écoulement d'un fluide visqueux à travers un milieu poreux, on voit déjà apparaître des valeurs moyennes. Ce sont des moyennes de la vitesse ou de la pression.

La loi de Darcy, déduite de façon expérimentale la première fois, et les généralisations ultérieures de cette loi, ont constitué depuis des décennies un sujet d'intérêt pour les mathématiciens, pour les mécaniciens et pour les ingénieurs.

Le développement progressif des logiciels du calcul numérique (CFD codes), impose l'utilisation des équations de conservation pour décrire l'écoulement du fluide à travers le milieu poreux. La modélisation, en vue d'obtenir des équations qui peuvent traduire correctement la complexité des phénomènes, est basée sur l'insertion d'un terme source à l'équation de conservation de quantité du mouvement, ce terme-là peut généralement être défini par la connaissance de deux constantes, qui sont propriétés intrinsèques du milieu poreux à modéliser.

L'objectif de ce mémoire est d'élaborer une méthode efficace pour le calcul des deux constantes de n'importe quel milieu poreux dont la géométrie (la structure des pores) n'est pas assez compliquée. La méthode est cent pour cent basée sur la simulation numérique de l'écoulement à travers le milieu poreux considéré. Et pour arriver à cette objectif, on a divisé le mémoire en trois chapitres distincts :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les publications réalisées sur les écoulement dans milieux poreux en discutant les différentes

méthodes utilisées pour la modélisation et la simulation de ce genre d'écoulement, les études expérimentales sont aussi discutées.

Dans le second chapitre est présentées les différentes définitions liées au phénomène des milieux poreux, tels que la porosité, la perméabilité, la tortuosité, ...etc. Aussi, ce chapitre donne une brève explication à la logique suivie par la majorité des codes de calcul numérique (CFD codes) pour modéliser les milieux poreux.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique sous le code du calcul AnsysFluent, en détaillant la méthode proposée pour le calcul des constantes intrinsèques de chaque milieu poreux. La discussion et l'interprétation des résultats obtenus sont aussi présentées.

Enfin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre N° : 1**Recherche Bibliographique**

Les premières études théoriques ont été menées par Dean [1] (1927) pour l'écoulement d'un fluide Newtonien dans une conduite tridimensionnelle courbée, et montrent notamment que des recirculations transverses à l'écoulement principal peuvent être observées. Dans cette étude, un nombre adimensionnel (nombre de Dean), fonction des forces d'inertie, de viscosité et de Coriolis, a été défini, et il est prouvé que les recirculations apparaissent lorsque le nombre de Dean excède une valeur critique proche de 36. En 1928, ses recherches sur l'instabilité des écoulements ont montré qu'une paire de cellules contrarotatives demeure dans les coudes et non pas dans les conduites droites. Il confirme un tel phénomène à l'effet de la courbure.

Les travaux actuels de Abdelkrim Bouaffane [2] comprennent une simulation numérique thermique de la force laminaire convection à l'intérieur d'un tube annulaire complètement rempli de matériau poreux. Le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer pour décrire le transport des fluides dans milieu poreux. Transfert d'énergie simulé à l'aide du LTNE : modèle local déséquilibre thermique entre les phases liquide et solide. la forme définitive à partir des équations gouvernantes avec leurs conditions aux limites sont converties en une forme sans dimension et détachée dans un volume limité de base un algorithme est adopté pour résoudre le groupe d'algèbres convergentes appariées équations.

Saoussene SLAMA [3] a présenté une étude sur les résultats d'une enquête numérique sur le transfert de chaleur mixte par convection et génération d'entropie de l'eau un nanofluide nanofluidique dans un canal poreux vertical. La paroi gauche est soumise à un flux thermique de variation sinusoïdale, tandis que le type correct est refroidi à une densité uniforme. Le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer est utilisé pour décrire le flux dans milieu poreux, considéré comme anisotrope en conductivité thermique, le modèle de buongiorno est utilisé dans l'écoulement des nanofluides pour rendre compte de l'effet de la thermophorèse et du mouvement brownien. Equations gouvernantes avec les conditions aux limites qui lui sont associées, elles sont résolues par la méthode des dimensions finies à l'aide de l'algorithme SIMPLE. Les effets des paramètres associés, notamment le nombre de Richardson (Ri), le rapport de flux de chaleur (Rq) et la taille des nanoparticules fraction, nombre de Darcy (Da),

rapport de contraste, température (NT) et Brownie (NB) Les paramètres d'écoulement et les champs thermiques sont analysés, ainsi que la génération d'entropie pour les flux non uniformes et chauffage uniforme. Les résultats ont montré que le taux de transfert de chaleur et les différents modèles d'irréversibilité augmentent avec la montée de Ri , NT , Rq et la diminution de Da . Le chauffage sinusoïdal est bénéfique pour le nombre moyen de Nusslet, Mais, malheureusement, il est défavorable pour générer de l'entropie totale avec des taux croissants allant jusqu'à 7% et 14%, successivement. De plus, il a été constaté que les champs dynamiques et thermiques deviennent très sensibles aux changements des différents paramètres cités ci-dessus lors de l'apparition de l'inversion du flux. Pour cette raison, les cartes montrent des cas l'occurrence de ce phénomène est mise en œuvre et une corrélation est proposée pour prédire le début de son apparition avec l'écart maximal 5% par rapport aux résultats numériques.

Melle HARITI Nabila [4] a présenté une étude. Cette étude consiste en une analyse thermique réalisée dans le but de déterminer les conditions optimales de fonctionnement pour améliorer les performances thermiques d'un échangeur à double flux à contre-courant avec insérez des matrices poreuses de chaque côté du tube interne. Le tube extérieur est isolé thermiquement et l'écoulement dans les couches poreuses est régi par le modèle générique de Darcy Brinkmann-Furchheimer. Pour ce faire, des solutions numériques de l'écoulement hydrodynamique et thermiquement développé sont présentées, en appliquant la méthode des volumes finis. Le code informatique, qui est généré en langage Fortran, est validé par comparaison avec quelques investigations mentionnés dans la littérature. L'effet de certaines propriétés techniques et thermophysiques a été étudié. Les résultats obtenus ont montré que la technique suggérée d'insertion de matrices poreuses pour ce type d'échangeur de chaleur peut améliorer ses performances si l'épaisseur, les perméabilités et les conductivités thermiques effectives des matrices poreuses insérées sont convenablement choisis. Aussi, cette technique peut conduire à une situation défavorable pour d'autres conditions où les matrices poreuses constituent des couches isolantes. Cependant, l'utilisation de cette technique est fiable lorsque son optimisation est vérifiée.

BOUMARAF Assia [5] a présenté une étude numérique de la convection naturelle par convection dans une enceinte rectangulaire à deux dimensions. Le matériau poreux du boîtier est isotrope et saturé d'un liquide binaire. Les parois horizontales du conteneur sont résistantes à la chaleur et imperméables. D'autre part, les parois verticales sont maintenues à différentes

températures et concentrations. Le liquide est de l'air et la substance circulant dans l'air de l'enveloppe est de la vapeur. La formulation de Darcy-Brinkman-Forchheimer est utilisée pour décrire le flux dans l'enceinte est rempli de milieu poreux. Les équations de modélisation sont estimées numériquement par la méthode des volumes finis. La décision a été prise par l'action (ADI) et la vitesse de couplage compression par algorithme (SIMPLER). Les résultats obtenus pour l'étude de la structure de l'écoulement, du transfert de chaleur et de la masse dans un milieu poreux sont autorisés à l'aide de diverses variables comme le nombre de Rayleigh, le nombre de Darcy, le nombre de Lewis, le rapport d'aspect, le rapport de flottabilité et l'angle d'inclinaison.

HAMIA Mohamed [6] a étudié l'écoulement laminaire dans un tube courbe à travers un milieu poreux. Les propriétés hydrodynamiques et thermiques sont déterminées par un calcul numérique. Les équations conservatrices sont écrites en coordonnées toroïdales. Les équations conservatrices avec des conditions aux limites appropriées sont résolues par la méthode de taille finie en préparant le programme de calcul Fortran. Les effets de certaines variables en écoulement statique (porosité, rapport de courbure, nombre de Dean...) ont été analysés. Les résultats ont montré que les propriétés du fluide dans le tube courbe dépendent de certains facteurs : vitesse axiale, distribution de température, coefficient de frottement et nombre de Nusselt. Les effets de ces paramètres sont exprimés en termes de nombres dimensionnels, respectivement, nombre de Dean, nombre de Darcy et rapport de courbure du tube.

Marcello et al [7] ont effectué une étude numérique de la convection forcée dans le système laminaire dans une couche poreuse délimitée par deux plaques planes. Les termes inertiels de Forchheimer et Navier-Stokes sont indiqués ainsi que le terme visqueux de Brinkman, l'état de déséquilibre thermique LTNE entre les deux phases est utilisé pour la simulation globale. Les résultats simulent l'effet du nombre de Reynolds, de la porosité, de la taille des particules et du rapport de conductivité thermique d'un solide-liquide sur le nombre de Nusselt spécifique pour les phases solide et liquide. Les résultats ont montré que de grandes valeurs de Reynolds, de faibles pores, de petits diamètres de particules et de faibles rapports de conductivité thermique sont liés à l'équilibre thermique entre les deux phases et conduisent à des valeurs de nombre de Nusselt plus élevées.

Bai-Xue Jiang [8] a étudié numériquement l'écoulement de fluide et le transfert de chaleur par convection dans un canal de plaque rempli de particules métalliques ou non métalliques.

Des simulations ont été réalisées à l'aide des modèles d'équilibre thermique local (LTE) et de

déséquilibre thermique (LTNE).

Les résultats de la simulation numérique sont par rapport à ses résultats expérimentaux, un nouveau modèle de dispersion thermique modifié a été présenté. Les effets de l'hypothèse d'équilibre thermique local ont été étudiés en relation avec le modèle LTNE et l'effet de la dissipation de chaleur sur le transfert de chaleur convectif. Le modèle LTNE est adapté aux milieux poreux non métalliques ou métalliques. La distribution de vitesse et les plages de température sont présentes.

Rudraiah et al. [9] ont introduit une analyse de stabilité non linéaire de manière plus complète, ils ont également évalué le transfert de chaleur et de masse des nombres de Rayleigh de porosité thermique et de solubilité jusqu'à 300 et 70, respectivement. L'effet de la diffusion thermique et du rapport de solubilité, du nombre de Brantel et de la transmission sur le flux convectif a également été analysé.

Prasad et Tontomo [10] ont utilisé l'équation de Darcy-Furchheimer étudier une grosseur normale dans une cavité folliculaire rectangle pour une large gamme de variables clés, et ils ont analysé l'effet du coefficient d'inertie sur le débit et le transfert de chaleur. Les auteurs ont montré que le nombre de Nusselt diminue avec l'augmentation du coefficient d'inertie. Le critère de passage de l'équation de Darcy au critère étendu au système de Forsheimer est également discuté. Dans le même ordre d'idées, Bejan et Polykacos [11] et Lauriat et Prasad [12] mettent en évidence la différence des résultats obtenus avec le modèle de Darcy et le modèle de Darcy-Furchheimer ou Darcy Brinkman.

Ramdane Younsi [13] a avancé cette thèse, les transferts de chaleur et de masse par convection naturelle dans les fluides confinés et les milieux poreux ont été étudiés numériquement. Ses deux parois parallèles sont maintenues à différentes températures et concentrations constantes. Les deux autres murs sont imperméables et bien isolés. Le phénomène de convection à l'intérieur de l'enceinte est décrit par les équations de Navier-Stokes, Equations de Conservation de l'Energie et des Espèces. Le milieu poreux a été conçu selon le modèle de Darcy-Brinkman et Forchheimer. Le flux convectif est régi par le nombre de Rayleigh (Ra), la flottabilité (N), le nombre de Prandtl (Pr), le nombre de Lewis (Le), le nombre de Darcy et la porosité ε . L'approche de contrôle du volume est utilisée pour résoudre les équations gouvernantes. En ce qui concerne la validation de l'algorithme numérique, les

résultats se sont avérés en excellent accord avec ces travaux antérieurs. L'effet des paramètres physiques et techniques a été examiné. Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la couche poreuse réduit la température globale et transfert de masse pour les faibles valeurs de transmittance. La diminution du transfert de chaleur avec l'augmentation de la flottabilité a été analysée à des nombres de Lewis élevés. De plus, afin de mettre à la disposition de l'ingénieur un outil lui permettant d'évaluer la chaleur et le soluté le transport qui se produit dans la formation du type étudié, des corrélations sont suggérées.

Matin et Ghanbari [14] ont étudié le problème de la convection mixte pleinement développée d'un écoulement de nanofluide dans un canal poreux avec les parois maintenues à différentes températures constantes. La dissipation visqueuse a été prise en compte, et les équations gouvernantes ont été résolues à la fois analytiquement et numériquement. Les effets des paramètres adimensionnels influents tels que les paramètres de Brownien et thermophorèse, le paramètre de convection mixte (Gr/Re), les nombres de Brinkman Br , de Darcy Da , et de Lewis sur les distributions de la vitesse, de la température, de la fraction volumique des nanoparticules, de la chute de pression, et nombre de Nusselt sont étudiés. L'objectif de l'étude de HAMZA CHERIF Othman [15] est d'analyser l'écoulement de l'eau dans le milieu poreux qui n'est pas saturé en eau grâce à la résolution d'équations utilisée par la méthode des éléments finis, et à cet effet (équation de Richard) qui est un programme en partie séquentiel séquentiel Calculer la pression de l'eau s'écoulant pendant un temps donné dans le milieu poreux.

Hadim (1994) [16] a étudié la convection forcée dans un conduit poreux comprenant des sources de chaleur locales pour deux états de formation : le premier cas étant un conduit totalement poreux et le second étant le conduit dit partiellement poreux car le milieu est poreux au-dessus des sources de chaleur et non poreux. -poreux ailleurs. Dans les deux cas, la longueur, l'espacement et la hauteur des sources de chaleur sont de même grandeur. Il est admis que l'écoulement dans le milieu poreux peut être modélisé à l'aide de l'équation de Darcy-Brinkmann-Furchheimer. porosité et la perméabilité est considérée comme constante. La viscosité apparente dans le terme de Brinkmann est prise égale à celle du liquide ; Quant à la dissipation visqueuse, elle est négligée et la dissipation thermique est intégrée à la conductivité thermique effective comme une constante. Le rapport de la conductivité thermique effective à celle du fluide est pris égal à l'unité. La paroi inférieure du canal est exposée à l'écoulement de chaleur est répartie sur chaque source de chaleur, tandis que

l'espacement entre ces sources de chaleur est constant. La paroi supérieure est complètement adiabatique. Le liquide entre dans le canal rapidement et à une température uniforme. A l'interface fluide poreux, le principe de continuité est pris en compte.

Alkam et Al-Nimr (1999) [17, 18] ont amélioré les performances thermiques des échangeurs de chaleur à tubes concentriques conventionnels en introduisant des réseaux poreux des deux côtés de la paroi interne du tube. Un modèle mathématique a été créé pour simulation du système considéré. Sur la base du schéma aux différences finies, on suppose que l'écoulement dans les canaux intérieur (a) et extérieur (b) est un axe symétrique, la couche lamellaire et limite, sans génération de chaleur interne et dissipation visqueuse et conduction axiale, est négligée. Le milieu poreux est considéré comme homogène, isotrope et saturé d'une phase fluide. Un équilibre thermique local est supposé entre la substance de base et le liquide, et les propriétés physiques de ces deux milieux sont supposées constantes. Les interactions entre milieu poreux et liquide pur sont simulées par la formulation de Darcy-Brinkmann-Furchheimer et la continuité des vitesses et des pressions à l'interface. On suppose que la paroi extérieure du tube est thermiquement isolée et que la paroi intérieure du tube a peu d'effet thermique.

Alkam M et al [17] ont étudié le problème de convection forcée dans un canal bidimensionnel à substrat poreux déposé sur la paroi inférieure du canal. Le fluide pénètre le canal avec une vitesse U_0 et une température T_0 . Le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer est employé à modéliser l'écoulement à l'intérieur du domaine poreux. Le milieu poreux est supposé homogène, isotrope, consolidé, saturé par un fluide avec les propriétés thermiques invariables. Le fluide est homogène, incompressible et en équilibre thermique local avec la matrice solide. Cette étude indique les effets de l'épaisseur de la couche poreuse, le nombre de Darcy, le rapport de conductivité thermique du substrat poreux, sur le transfert thermique. Les résultats prouvent que pour un nombre de Darcy inférieur à 10^{-4} , on peut éliminer l'effet du coefficient à inertie microscopique tandis que pour grand coefficient à inertie microscopique, plus grand que 10^3 , l'effet du nombre de Darcy est insignifiant. Le transfert thermique peut être augmenté en utilisant des insertions à grande conductivité thermique, un nombre décroissant de Darcy, et un coefficient d'inertie microscopique croissant. Le remplissage total du canal par le substrat poreux donne une valeur maximale du nombre de Nusselt.

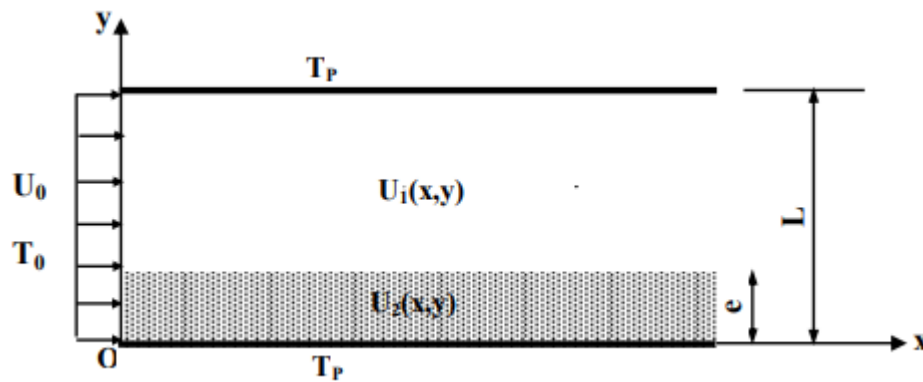


Fig.1. 1: Représentation schématique du modèle physique (Alkam et al, 2001).

Pierre-Lou BILLEROT [19] a présenté une étude sur la combustion des milieux poreux (PMC), un processus qui a été étudié empiriquement et numériquement au cours des trois dernières décennies. Cependant, les études numériques sont souvent limitées aux modèles 1D et 2D en raison de difficulté à reproduire un modèle 3D complet en raison de la complexité des matrices en mousse spongieuse généralement utilisées pour ce type d'application et des coûts de calcul élevés. Désormais, avec l'avènement des techniques innovantes d'impression additive 3D, il est possible de concevoir des moules dans un style plus structuré et organisé.

Cette étude vise à modéliser le comportement d'écoulement et les propriétés de combustion dans un tel milieu homogène pouvant être obtenu par impression additive. Le modèle numérique a été construit à l'aide du logiciel STAR-CCM+ qui résout le système écrit des équations de Navier-Stokes pour les écoulements compressibles, en flocons et instables.

Pour suivre la géométrie relativement complexe du milieu poreux étudié, un modèle numérique a d'abord été construit en étudiant l'écoulement autour du cylindre afin de déterminer des propriétés de réseau adaptées à une modélisation d'écoulement à petite échelle. Ainsi ce réseau est appliqué à la géométrie du milieu poreux reproduit sur un taille représentative. Les analyses microscopiques et microscopiques sont ensuite réalisées sur un flux isotherme froid. Différents régimes d'écoulement sont observés le gradient de pression macroscopique montre un bon accord avec les corrélations basées sur la loi de pression de Darcy-Furchheimer. Les notes apparaissent à petite échelle le comportement du fluide dans les pores du milieu. Enfin, la combustion dans le milieu poreux est maîtrisée sur toute la plage de fonctionnement stable. Les propriétés macroscopiques du CMP sont décrites. A l'échelle des pores, la structure ordonnée de la matrice réduit la dispersion et permet d'observer une combustion plus homogène. Les fluctuations de température locales sont moins importantes.

Cette homogénéité le flux prolonge la durée de vie des moules et réduit les émissions polluantes.

Dans les recherches et études menées par Salah Sheikh et al [20] sur la grosse forcée dans un espace annulaire partiel ou complètement rempli de matériau poreux. Deux conditions aux limites sont imposées au cylindre intérieur (température constante et densité de débit constante), le cylindre extérieur est isolé thermiquement. Dans la couche poreuse déposée sur le cylindre intérieurement, l'écoulement est modélisé par l'équation générale de Darcy-Brinkman-Forscheimer et les deux phases (liquide-solide) sont supposées en équilibre thermique local. Les effets de la perméabilité, de la conductivité thermique et de l'épaisseur du milieu poreux sur la création du régime thermique sont étudiés. Les résultats montrent que la couche de matériau poreux réduit la longueur de la construction du système thermique et le nombre de Nutslet dans la zone d'entrée. En régime permanent, une augmentation du transfert de chaleur est obtenue lorsque l'épaisseur, la perméabilité et la conductivité thermique effective du milieu poreux sont convenablement choisies.

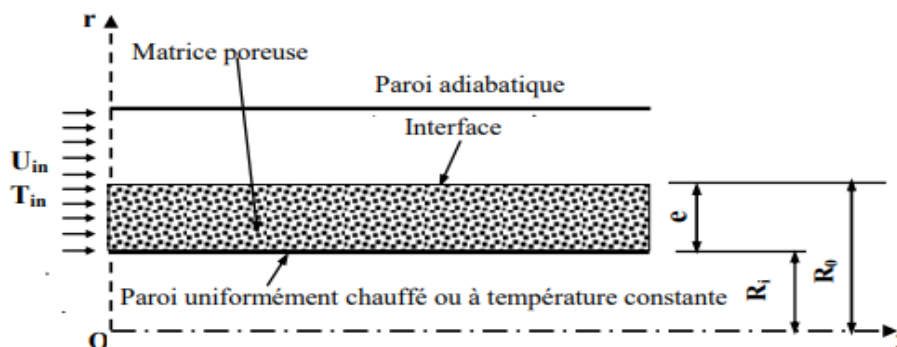


Fig.1. 2: Représentation schématique du modèle physique (Chikh et al, 1997).

Au cours de ses recherches, Fatah Mejni [21] a découvert que le problème de Rayleigh-Bénard (R-B) est incontestablement le modèle standard parmi les systèmes hors équilibre qui ont été étudiés dans différents laboratoires à travers le monde. Celle-ci consiste à maintenir une fine couche de liquide entre deux plaques horizontales de températures différentes, la température de la plaque inférieure étant plus élevée que celle de la plaque supérieure. Lorsque la différence de température entre deux panneaux ont dépassé une valeur critique, une structure spatiale périodique est représentée (Figure 3).

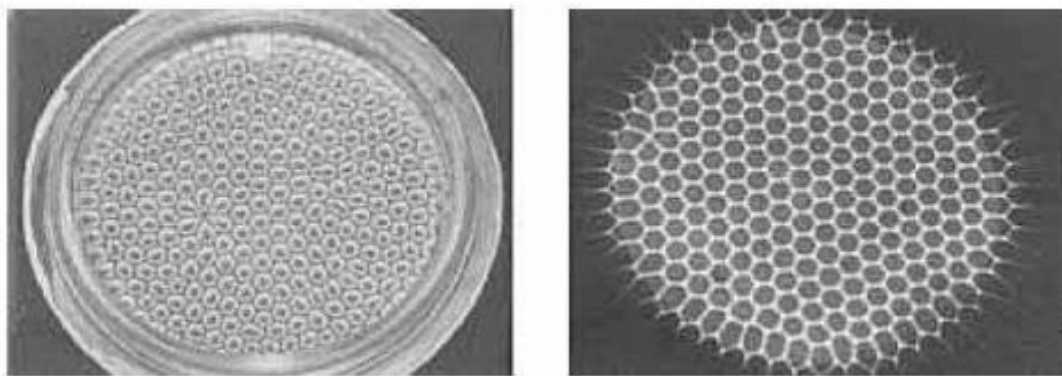


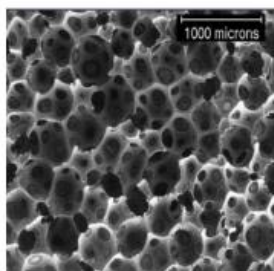
Fig.1. 3 : Cellules hexagonales obtenues dans des conditions similaires à celles de Bénard observées par Koschmieder et Pallas [22].

Chapitre N° : 2**Généralité sur les Milieux Poreux****1. Milieux poreux :****1.1. Définition :**

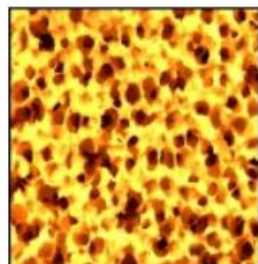
Un milieu poreux est constitué à l'échelle microscopique d'une phase solide et d'une phase de "vide" appelée "pore" dans laquelle circule un fluide. A l'échelle macroscopique on modélise ce milieu par un milieu continu muni d'un paramètre particulier : la porosité [23]. On trouve de nombreux matériaux naturels dans cette catégorie : les sols, les couches sédimentaires, la plupart des roches, ainsi que certains matériaux vivants. Certains matériaux artificiels requièrent d'être poreux soit dans le processus de fabrication soit dans leur finalité pour jouer un rôle de filtre ou apporter des propriétés macroscopiques particulières (conductivité thermique pour la mousse isolante par exemple) [15]. Les milieux poreux occupent une place et un rôle importants dans de nombreux domaines industriels aussi bien naturels ; on les rencontre par exemple en génie pétrolier, médecine, chimie, géologie, etc.

Un milieu poreux est un matériau composé d'une matrice solide à l'intérieur de laquelle se trouvent des pores reliés entre eux ou éventuellement isolés. On peut distinguer :

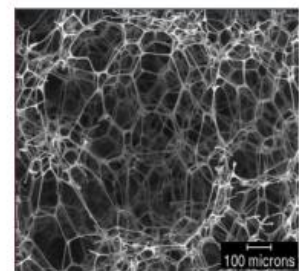
- Les matrices solides non consolidées où la phase solide est formée de grains (par exemple le sable, le gravier, billes de verres, d'acier...), ou formée de fibres, pratiques pour l'expérimentation ; Figure (2.1). [3]
- Les matrices solides consolidées dans lesquelles la phase solide est formée de grains cimentés (par exemple les roches calcaires, le grès, l'argile, le bois, tissu biologique...) ; Figure (2.2). [3]



Une mousse de polyuréthane



Une mousse de cuivre



Une mousse de mélanine

Fig. 2.1 : Milieux poreux consolidés.

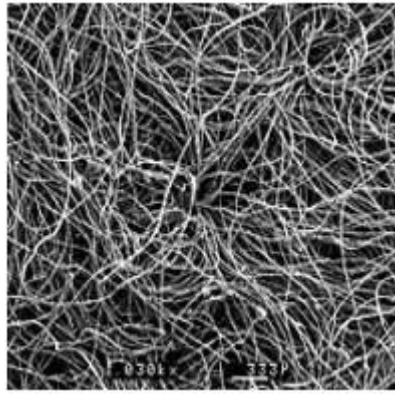


Fig.2.2 : Milieu poreux non consolidé.

1.2. Caractéristiques des milieux poreux

1.2.1. Porosité

Le volume total V_T d'un matériel poreux est constitué de la somme du volume des solides V_s et du volume des pores (ou vides) V_v présents dans le volume total de matériel [21] :

$$V_T = V_v + V_s. \quad (2.1)$$

Lorsque le volume total considéré est unitaire, la somme ci-dessus est égale un. La Porosité φ est définie comme étant le rapport du volume des pores V_v d'un matériel sur son volume total V_T :

$$\varphi = \frac{V_v}{V_T} \quad (2.2)$$

Puisqu'il s'agit d'un rapport de mêmes propriétés, la porosité n'a pas d'unités et elle est souvent exprimée en pourcentage. Les valeurs de la porosité sont [25] :

$$\begin{cases} \varphi = 0 & \text{solide pure} \\ 0 < \varphi < 1 & \text{milieu poreux} \\ \varphi = 1 & \text{fluide pure} \end{cases}$$

1.2.2. Perméabilité

C'est une propriété caractéristique du milieu poreux elle désigne la capacité à laisser passer un fluide à s'écouler. Ces écoulement se font par des chemins complexes et tortueuse à travers les pores interconnecté et de différent taille et de forme, cette perméabilité elle est influencé par de nombreuse facteur, principalement sont [15] :

- Forme des pores (la taille et la distribution de ces pores)
- La température influe sur la viscosité par conséquent le comportement du fluide change.

La perméabilité traduit la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité notée K et dépend uniquement de la porosité et de la géométrie de la matrice solide [13]. La relation de Kozeny-Carmen (1937), donne une estimation de la perméabilité K pour un milieu poreux non consolidé constitué d'éléments identiques de géométrie simple :

$$K = \frac{D^2 \varphi^3}{36 C_0 (1-\varphi)^2}, \quad (2.3)$$

où, D désigne une dimension caractéristique des éléments constituant la matrice poreuse et C_0 une constante dépendant de la forme des grains ($3.6 < C_0 < 5$). Pour un écoulement unidirectionnel d'un fluide incompressible au sein d'une colonne poreuse constituée de particules sphériques, de diamètres D et soumise à un gradient de pression, l'équation de Kozeny –Carmen devient comme suit :

$$K = \frac{D^2 \varphi^3}{150 C_0 (1-\varphi)^2}, \quad (2.4)$$

ce qui correspond à une valeur de C_0 de la loi de Kozeny – Carmen.

1.2.3. Volume élémentaire représentatif (V.E.R) :

Lorsqu'on s'intéresse à l'étude des phénomènes physiques dans les milieux poreux, deux échelles s'imposent pour leur analyse [3] :

- L'échelle des pores ou des fissures (microscopique) à l'intérieur de laquelle les grandeurs (vitesse, pression,...) locales ou microscopiques peuvent largement varier à cause de l'irrégularité de la disposition et de la taille des pores.
- L'échelle du milieu poreux ou macroscopique caractéristique de variations significatives de ces mêmes grandeurs définies en moyenne sur un certain volume du milieu poreux. L'approche la plus simple utilisée est l'approche du volume élémentaire représentatif (V.E.R). Dans cette approche la variable macroscopique est définie comme étant une moyenne appropriée sur un volume élémentaire représentatif suffisamment large. Cette

opération donne la valeur de cette moyenne appropriée au milieu du V.E.R. Il est supposé que cette valeur soit indépendante de la taille du V.E.R. et définie comme suit :

- Suffisamment grande pour renfermer un grand nombre de pores nécessaires à la définition d'une propriété moyenne globale, de manière à s'assurer que les fluctuations d'un pore à un autre se traduisent par des effets négligeables.
- Suffisamment petit par rapport à la longueur caractéristique de la matrice solide. Autrement dit on peut considérer, par la suite, que le milieu poreux est un ensemble de V.E.R. Cette conceptualisation permet de raisonner en termes de milieu continu équivalent. La Figure (2.3) illustre un volume élémentaire représentatif à travers un domaine d'écoulement [3].

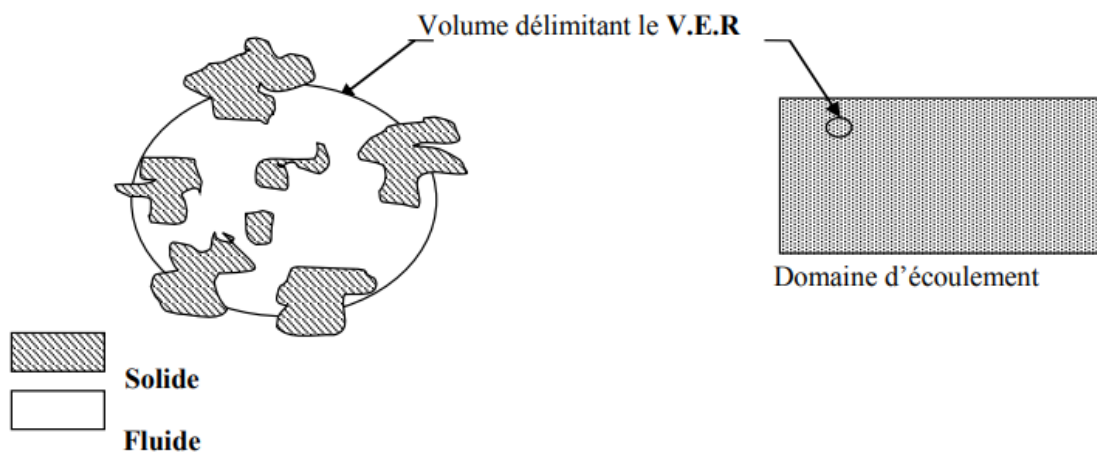


Fig.2.3 : Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R).

Pour quantifier un problème de la physique, en utilisant les outils mathématiques de solution qu'offrent les équations différentielles, 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 [21].

1.2.4. 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 [25] :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (2.5)$$

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

1.2.5. Surface spécifique

Les milieux poreux se caractérisent par leur grande surface interne [26]. La surface spécifique d'un tel matériau est défini par le rapport suivant [26] :

$$A_s = \frac{S}{V_0}, \quad (2.6)$$

V_0 : échantillon de volume du pore.

S : surface interne du pore.

2. Lois appliquées dans les milieux poreux :

2.1. Loi de Darcy généralisée :

La dynamique des fluides homogènes dans les milieux poreux, est décrite par la loi de Darcy établie en 1856 sur des fondements expérimentaux. Cette loi, s'établie pour un écoulement unidirectionnel sur des colonnes de sables, a mis en évidence la proportionnalité du gradient de pression appliqué et le débit d'eau traversant la colonne de sable. La loi de Darcy même pour les écoulements multidirectionnels à travers un milieu poreux isotrope. Elle s'écrit comme suit :

$$\vec{\nabla} P = -\frac{\mu}{K} \vec{V}; \quad (2.7)$$

où \vec{V} est la vitesse de filtration, μ est la viscosité dynamique du fluide, K est la perméabilité du milieu poreux et $\vec{\nabla}P$ le gradient de pression.

2.2. Modèle de Darcy – Forchheimer

Ce modèle est utilisé pour décrire l'écoulement de fluide à vitesses élevées. En effet, dans de telles situations, les effets inertiels microscopiques sont importants et doivent être pris en compte dans l'équation de mouvement. Ward (1964) a adapté le modèle de Darcy en introduisant un terme représentant les forces d'inertie :

$$\vec{\nabla}P = -\frac{\mu}{K}\vec{V} + \rho g - \rho_f \frac{C}{\sqrt{K}}|\vec{V}|\vec{V}, \quad (2.8)$$

où C est une constante adimensionnelle souvent appelée coefficient inertiel.

2.3. Modèle de Darcy – Brinkman

Pour tenir compte des effets pariétaux, Brinkman (1947) a établi une équation d'écoulement, en combinant l'équation de Darcy et celle de Navier – Stokes. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{\nabla}P = -\frac{\mu}{K}\vec{V} + \rho g - \mu_e \vec{\nabla}^2 \vec{V}, \quad (2.9)$$

où μ_e est la viscosité effective du milieu poreux. La difficulté de l'utilisation de ce modèle est l'évaluation de la viscosité effective du milieu poreux qui est généralement prise égale à celle du fluide.

Et $\mu_e \vec{\nabla}^2 \vec{V}$ est le terme de Brinkman qui représente les forces visqueuses causées par les forces de cisaillement microscopiques le long des frontières solides. Il est très significatif dans les régions près des parois solides

3. Modélisation des milieux poreux :

Nous avons de ce côté un exemple simple de problème à réfléchir qui aide à comprendre le fonctionnement des zones poreuses. Compte tenu du passage d'écoulement que vous pouvez voir sur la figure (1) avec l'écoulement partant de la gauche à droite de la station 1 à la station

2 et le flux traverse une zone poreuse au milieu qui est surlignée en bleu foncé.

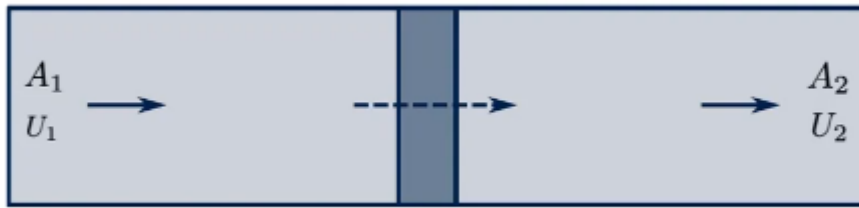


Fig. 2.4 : Milieu poreux

- Envisager un passage à écoulement de surface constant avec une obstruction.
- De la continuité on trouve : $\rho U_1 A_1 = \rho U_2 A_2$
- Donc $U_1 = U_2$ (si incompressible)

Il peut y avoir un mélange et des structures d'écoulement fines générées à partir des zones poreuses, mais le volume moyen doit être le même. Et ce que cela nous dit physiquement, c'est que la porosité est propre car une obstruction ne supprime pas l'énergie cinétique de l'écoulement. Cependant, la zone poreuse retirera toujours de l'énergie de l'écoulement. et la façon dont nous le faisons consiste à retirer l'énergie du flux sous forme de chute de pression, car nous ne pouvons pas supprimer l'énergie cinétique, nous supprimons donc l'énergie de pression du flux.

3.1. La chute de pression :

En général, nous ne savons pas exactement quelle sera la chute de pression, mais les mesures expérimentales nous disent que plus la vitesse d'écoulement traversant l'obstruction est rapide, plus la chute de pression est importante, et sur la base de ce raisonnement physique, nous pouvons trouver l'équation (1) qui dit que la chute de pression à travers l'obstruction peut être donnée par un polynôme de vitesse :

$$\Delta p = C_1 U + C_2 U^2 + C_3 U^3 + \dots + C_{n+1} U^{n+1} \quad (1.10)$$

- Cependant, il est courant de n'inclure que les termes linéaires et quadratiques, et sur cette base nous pouvons trouver l'équation (1.11) :

$$\Delta p = C_1 U + C_2 \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1.11)$$

- Le terme quadratique s'écrit comme une tête dynamique ($\frac{1}{2} \rho U^2$) commodité.

3.2. Les équations de Navier-Stokes :

Pour comptabiliser le milieu poreux dans les équations de Navier-stokes et la résoudre par le code CFD. Nous avons l'équation (2.12) :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla U) + (\nabla U)^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot U) I + \rho g + S \quad (2.12)$$

- Un terme source S est ajouté aux cellules qui se trouvent dans le milieu poreux
- la zone poreuse n'est pas ajoutée en tant que chute de pression

3.3. Terme source :

Le terme source est 0 dans toutes les cellules du maillage qui ne sont pas dans le milieu poreux, mais pour les cellules qui sont dans les milieux poreux, nous avons une contribution au terme source (s), comme dans la figure (2.5). Il est également important de noter que ce terme source s'applique aux centres des cellules pour les codes CFD à volume fini centrés sur les cellules. Le terme source est appliqué aux centres de gravité des cellules.

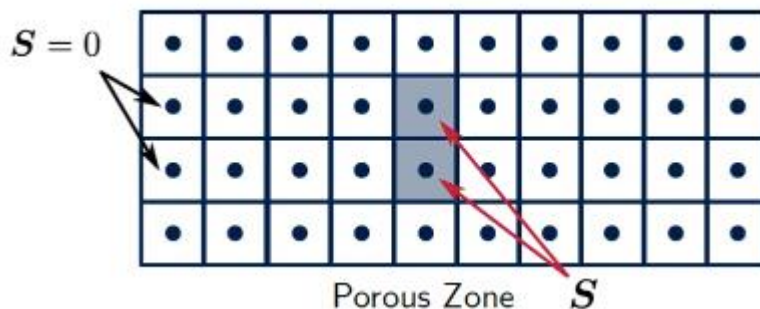


Fig. 2.5 : Les termes sources

- Le terme source en général dans les équations de Navier-Stokes a des unités de force / volume.
- Pour un système cartésien (xyz), considérez la composante x de la chute de pression.

$$\Delta p_x = C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x \quad (2.13)$$

$$F_x = -\Delta p \cdot A = -\left(C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x\right) A \quad (2.14)$$

$$S_x = \frac{F_x}{V} = -\left(C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x\right) \frac{1}{t} \quad (2.15)$$

➤ t est l'épaisseur du milieu poreux dans le sens de l'écoulement que l'on considère.

la figure (2.6) ci-dessous montre l'épaisseur de la zone poreuse si le flux est dans la direction x afin que vous puissiez voir le flux de gauche à droite et la vitesse rencontrera cette zone frontale des zones poreuses là et le l'épaisseur t est l'épaisseur dans la direction de l'écoulement, pour ta composante y si l'écoulement s'approchait de la zone poreuse de haut en bas, l'épaisseur cette fois serait l'épaisseur dans la direction de l'écoulement y que vous pouvez voir est de haut en bas.



Fig.2.6 : Termes source

➤ l'épaisseur du support est incorporée dans les coefficients C_1 et C_2 .

$$S_x = -\left(C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x\right) \frac{1}{t} \quad (2.16)$$

$$S_x = -\left(\frac{C_1}{t} U_x + \frac{C_2}{t} \frac{1}{2} \rho |U| U_x\right) \quad (2.17)$$

➤ C_1/t a des unités de $[kg/m^3]$

➤ C_2/t a des unités de $[1/m]$

4. Loi de darcy :

➤ Pour un écoulement à travers un milieu poreux aux états bas de darcy à faible nombre de Reynolds :

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\alpha} U_x \quad (1.18)$$

➤ Comparer cela avec la relation générale de chute de pression (4).

$$\Delta p_x = C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x \quad (1.19)$$

on peut donc écrire :

$$\frac{C_1}{t} = \frac{\mu}{\alpha} \quad (1.20)$$

5. Calcul des coefficients :

Pour notre zone poreuse, il faut préciser :

$$\frac{C_2}{t} [1/m]$$

et

$$\frac{C_1}{t} [kg/m^3] \quad \text{ou} \quad \frac{\mu}{\alpha} [kg/m^3].$$

Chapitre N° : 3

Simulation Numérique

3.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente une étude numérique d'un écoulement thermo convectif à travers une conduite plane partiellement remplie par un milieu poreux. Les diffusions dynamique et thermique sont considérées bidimensionnelles. La simulation numérique est effectuée sous le code du calcul Ansys-Fluent 14.5, dont la discrétisation est basée sur la méthode des volumes finis. Cette méthode est utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans et d'hors du milieu poreux. L'objectif de ce chapitre est de bien éclairer la signification physique des constantes C_1 et C_2 qui sont détaillées dans le chapitre précédent, et dont la connaissance préalable est indispensable pour simuler n'importe quel écoulement à travers un milieu poreux sous le code du calcul Ansys-Fluent. Aussi, dans ce chapitre on va présenter une méthode suffisamment efficace pour le calcul des constants C_1 et C_2 dans le cas d'un milieu poreux dont la géométrie n'est pas assez compliquée à dessiner.

3.2. Modèles physiques

Le système à étudier est schématisé dans les figures (3.1a) et (3.1b). Il est constitué de deux plaques parallèles représentant la conduite traversée par un fluide caloporteur, dont la température et la vitesse à l'entrée sont constantes. Au centre de la conduite le milieu poreux est placé.

Comme première étape, on considère le milieu poreux comme un empilement des cylindres plain et solides et répartis uniformément et placée horizontalement devant l'écoulement du fluide. Ce dernier entre dans la conduite avec une vitesse moyenne égale à V_0 , et une température constante égale à T_0 . La longueur et la largeur de la conduite sont respectivement L et H . Les cylindres qui sont de même diamètre D , sont aussi équidistants par une distance égale à a . l'épaisseur de la zone poreuse (cylindres empilés) est L_0 , voir figure (3.1a). En effet, l'objectif de simuler un tel problème est de déterminer les constantes C_1 et C_2 intrinsèques de la zone poreuse.

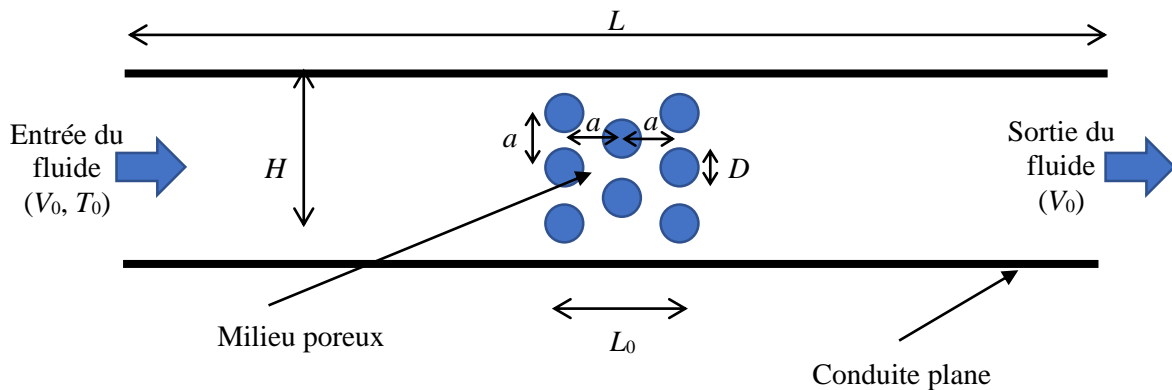


Fig. 3.1a : Première configuration à étudier, milieu poreux effectif.

Dans la deuxième étape, le milieu poreux est traité comme une zone fluide à travers laquelle le fluide perd son énergie potentielle sous forme de perte de pression, et ceci par l'introduction des constantes C_1 et C_2 calculées dans la première étape. En effet, l'objectif de simuler ce deuxième problème est de se confirmer des valeurs des constantes C_1 et C_2 en comparant la perte de pression dans les deux cas. Alors, les caractéristiques thermo-physiques du fluide caloporteur et ces paramètres à l'entrée, telles que la vitesse et la température doivent être les mêmes. Et de même pour les caractéristiques géométriques de la conduite et la zone poreuse, telle que L , H et L_0 , voir figure (3.1b).

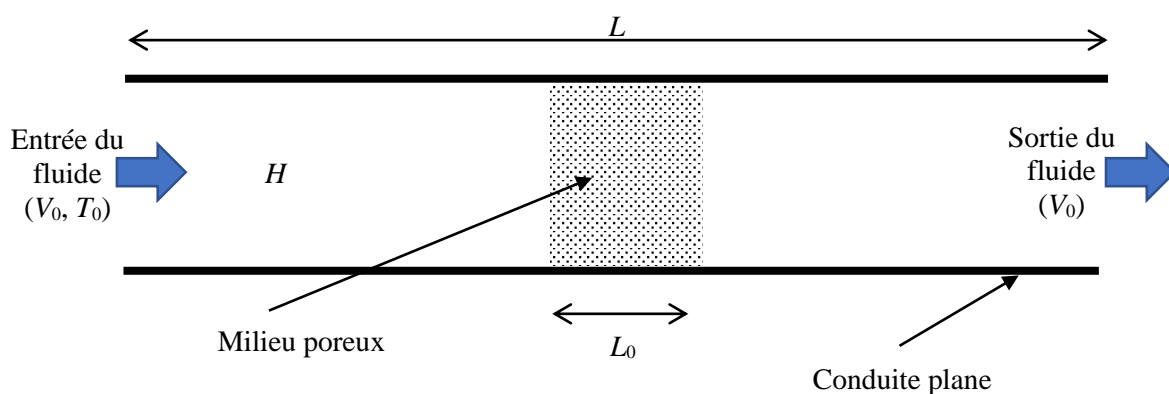


Fig. 3.1b : Deuxième configuration à étudier, milieu poreux fictif.

Pendant la simulation, les hypothèses suivantes ont été considérées pour le modèle mathématique :

- Le fluide est Newtonien et incompressible.
- L'écoulement est turbulent sans dissipation visqueuse.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide sont constantes le long de l'écoulement.
- Les parois de la conduite sans adiabatique.

D'ailleurs, Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés sont données dans le tableau (3.1).

Table. 3.1 : Propriété thermo-physiques des matériaux utilisés.

Propriétés	Air	Aluminium
Masse volumique (ρ), [Kg/m]	1.225	2719
Capacité thermique (C_p), [J/Kg.K]	1006.43	871
Conductivité thermique (k), [W/m.K]	0.0242	202.4
Viscosité (μ), [Kg/m.s]	1.7894E-5	/

3.3. Conditions aux limites :

Le domaine du calcul est limité par la paroi supérieure, la paroi inférieure, l'entrée et la sortie du fluide. Pour la première configuration les parois des cylindres séparent les deux milieux solide et fluide, ce qui impose une continuité de la diffusion thermique et discontinuité de la diffusion dynamique (vitesse dans le solide égale à zéro), voir figure (3.2a). Pour la deuxième configuration, les interfaces séparant la zone fluide et la zone poreuse assurent la continuité des deux diffusions thermique et dynamique, voir figure 3.2b. Alors, les conditions aux limites sont imposées comme suit :

Limite	L'entrée	La sortie	Les deux parois	Les parois des cylindres (1 ^{er} cas)	Les interfaces (2 ^{ème} cas)
Condition	$\begin{cases} T = T_0 \\ V_x = V_0 \\ V_y = 0 \end{cases}$	$P = 0$	$\begin{cases} V_x = 0 \\ V_y = 0 \\ \partial T / \partial y = 0 \end{cases}$	Continuité de la diffusion thermique et discontinuité de la diffusion dynamique	Continuité des diffusions thermique et dynamique

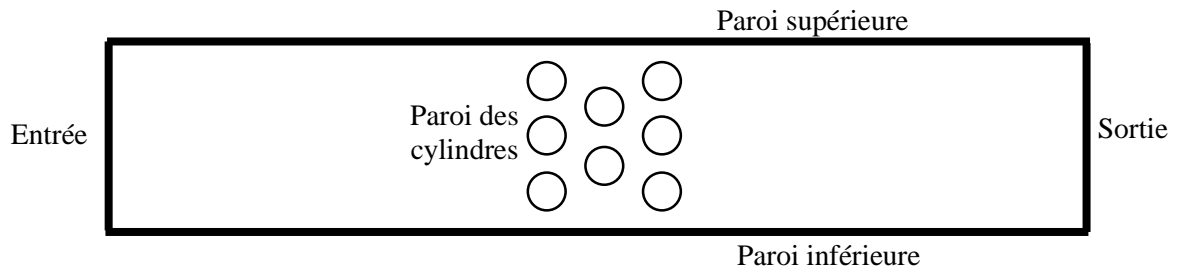


Fig. 3.2a : Conditions aux limites, 1^{er} cas : milieu poreux effectif.

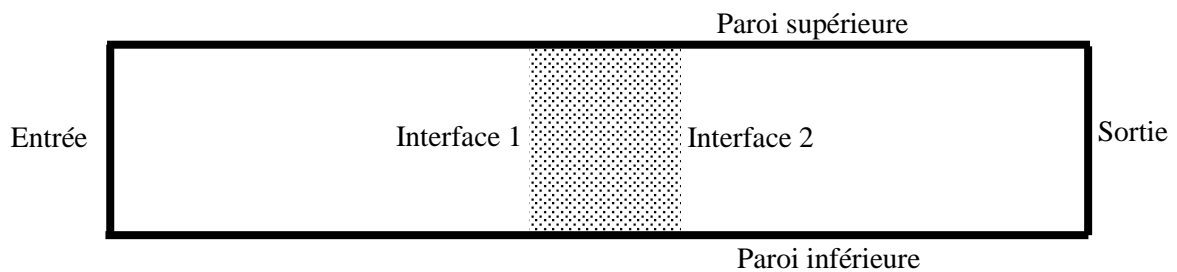


Fig. 3.2b : Conditions aux limites, 2^{ème} cas : milieu poreux fictif.

3.4. Génération du maillage

La figure (3.3) représente la géométrie et le maillage généré pour les deux cas de simulation. Pour le premier cas ou le milieu poreux est effectif, le maillage de type triangulaire est choisi pour les deux domaines fluide et solide. Mais aux alentours des parois des cylindres ou les gradients des vitesses sont importantes, un maillage quadrilatéral bien raffiné est adopté. Pour le deuxième cas ou le milieu poreux est fictif, tous le domaine du calcul est discrétisé par un maillage quadrilatéral, structuré et uniforme.

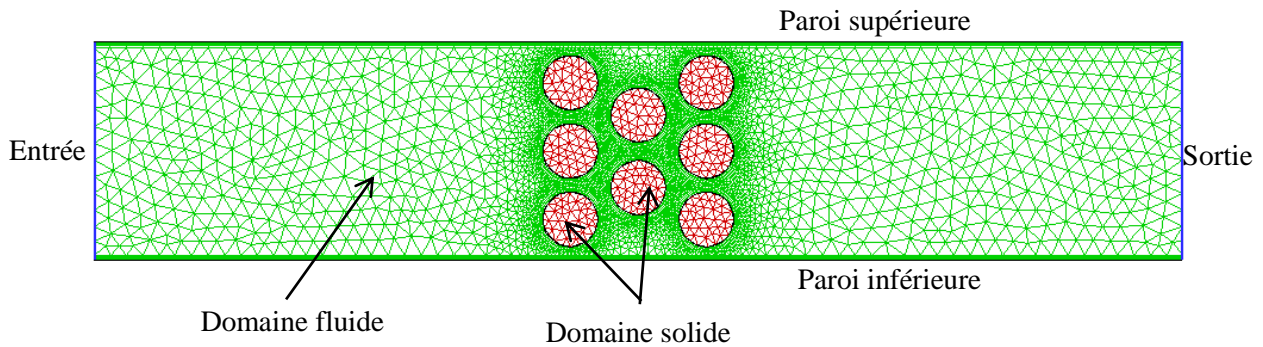


Fig. 3.3a : Maillage du domaine du calcul, 1^{er} cas : milieu poreux effectif.

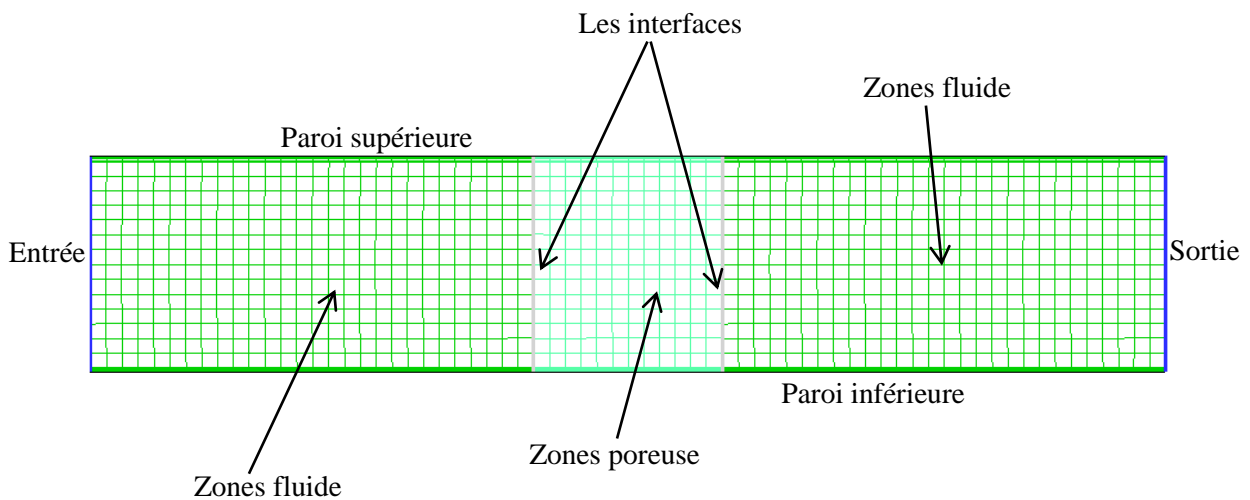


Fig. 3.3b : Maillage du domaine du calcul, 2^{ième} cas : milieu poreux fictif.

3.5. Test de maillage

Avant de commencer la simulation on est obligé de chercher le bon maillage pour les deux cas de simulation (les deux configurations). Pour ce faire, nous allons adopter deux valeurs de la vitesse à l'entrée : $V_0 = 10$ et 100 m/s , qui correspondent à des nombres de Reynolds $Re = 5.48 \times 10^4$ et 5.48×10^5 respectivement. Le fluide utilisé est l'air et les constantes C_1 et C_2 utilisée dans la deuxième configuration sont choisies aléatoirement à $C_1 = 1000 \text{ m}^{-2}$ et $C_2 = 400 \text{ m}^{-1}$. En effet, pour générer un maillage pour nos deux configurations, il y a trois paramètres principaux sur lesquels nous pouvons jouer, qui sont les tailles minimale et maximale des mailles et le nombre de division sur les parois de la conduite et sur les parois

des cylindres. Pour la première configuration nous allons varier le nombre de division entre 20 et 100, en fixant la taille minimale des mailles à 0.5 mm et la taille maximale à 5 mm . Puis, on varie la taille maximale des mailles en fixant la taille minimale à 0.5 mm et le nombre de division à 90. Pour le deuxième configuration nous pouvons jouer sur la taille maximale des mailles en fixant la taille minimale 0.5 mm sans parler du nombre de division sur les parois des cylindres parce qu'ils n'existent pas dans ce cas.

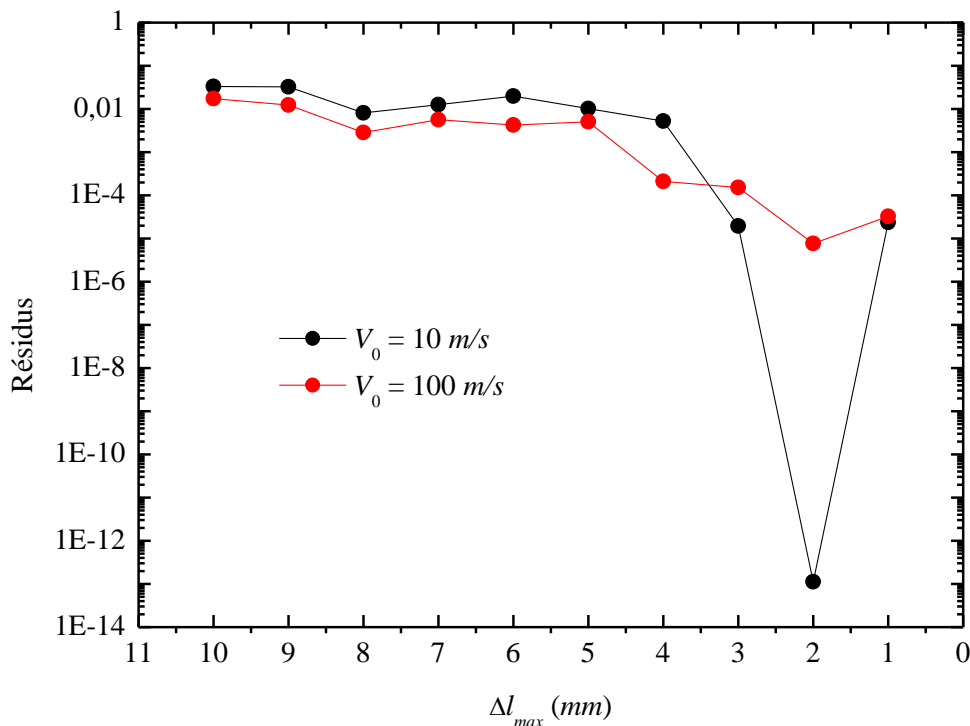


Fig. 3.4a : Test de maillage pour la première configuration, évolution des résidus maximums en fonction de Δl_{max} .

Pour la première configuration, nous avons poursuivi la convergence de la solution numérique en traçant l'évolution de l'erreur maximale du calcul (les résidus) en fonction de la taille maximale des mailles. Cette évolution est présentée sur la figure 3.4a qu'elle montre que la meilleure convergence de la solution numérique peut être obtenue pour une taille maximale des mailles égale à 2 mm , où les résidus maximums sont inférieurs à 10^{-5} pour les deux valeurs de la vitesse à l'entrée. Sur la figure (3.4b), nous présentons l'évolution de la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la conduite en fonction du nombre de division sur les parois, nous constatons que la valeur de la différence de pression se stabilise après une valeur de division $N = 90$ ou l'erreur relative de Δp obtenue en comparant avec celle de $N = 100$ et

de l'ordre de 0.25 %. Donc pour le reste de simulation, nous adoptons les valeurs suivantes pour la première configuration :

Taille minimale : $\Delta l_{min} = 0.5 \text{ mm}$.

Taille maximale : $\Delta l_{max} = 2 \text{ mm}$.

Nombre de division : $N = 90$.

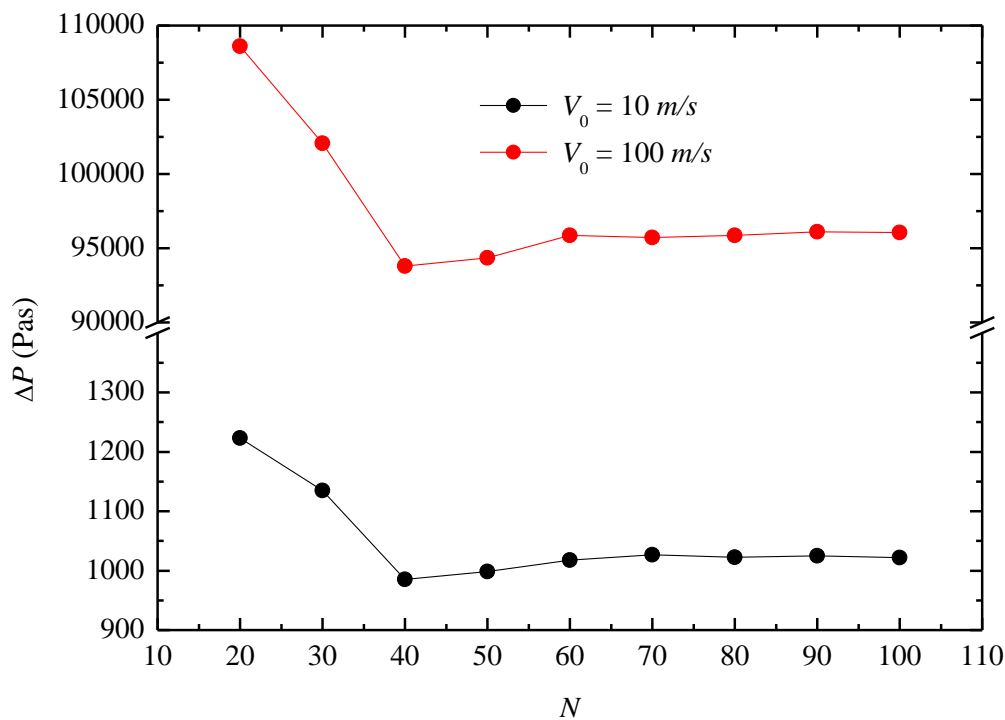


Fig. 3.4b : Test de maillage pour la première configuration, évolution de la différence de pression en fonction de N .

Pour le deuxième cas de simulation, nous avons poursuivi la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la conduite en présentant son évolution en fonction de la taille maximale des mailles. Dans la figure 3.4c, nous constatons que la différence de pression se stabilise après une valeur de $\Delta l_{max} = 2 \text{ mm}$, ou l'erreur relative de Δp obtenue en comparant avec celle $\Delta l_{max} = 1 \text{ mm}$ et de l'ordre de 0.36 %. Donc pour le reste de simulation, nous adoptons les valeurs suivantes pour la deuxième configuration :

Taille minimale : $\Delta l_{min} = 0.5 \text{ mm}$.

Taille maximale : $\Delta l_{max} = 2 \text{ mm}$.

Nombre de division : $N = 90$ pour les parois extérieures de la conduite.

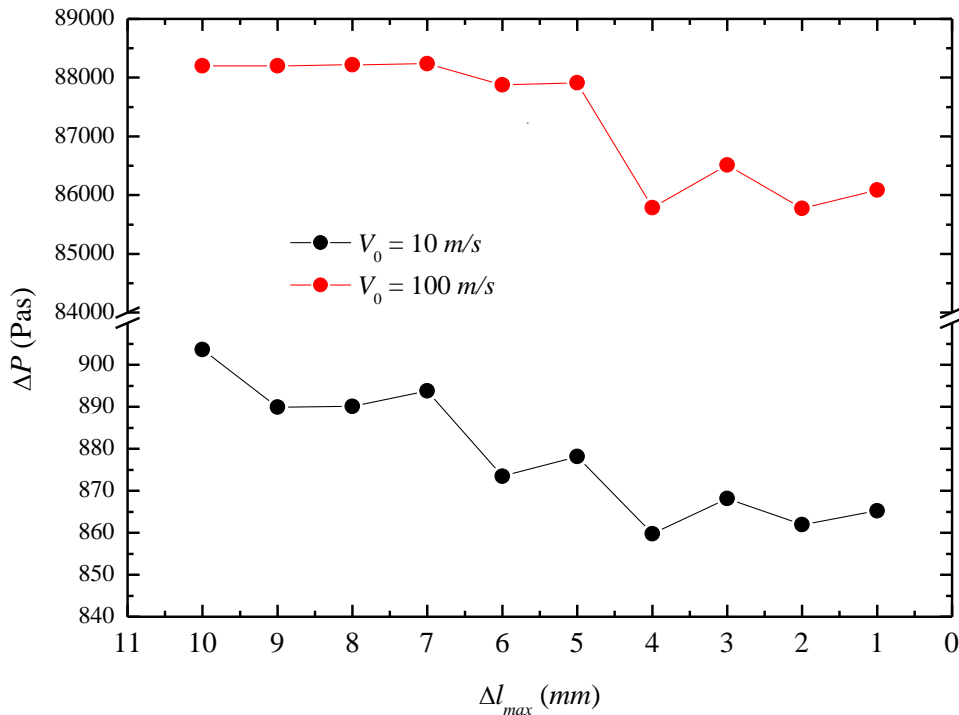


Fig. 3.4c : Test de maillage pour la deuxième configuration, évolution de la différence de pression en fonction de Δl_{max} .

3.6. Formulation Mathématique

Les équations qui gouvernent l'écoulement stationnaire et bidimensionnel d'un fluide newtonien et incompressible traversant un milieu poreux en régime turbulent, sont :

- L'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

(3.1)

où u et v sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y , respectivement.

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement suivant l'axe x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x$$

(3.2)

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement suivant l'axe y :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y$$

- L'équation de conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} \right) + S_T \quad (3.3)$$

- L'équation de darcy :

$$\vec{\nabla} P = -\frac{\mu}{K} \vec{V}$$

(3.4)

Donc, en gros nous avons un système mathématique de quatre équations et quatre inconnues (V_x , V_y , P et T) à déterminer pour chaque couple (x, y) . En effet, le système mathématique ci-dessus sera résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis sous le code du calcul AnsysFluent. Le couplage pression-vitesse a été traité en employant un schéma implicite basé sur l'algorithme COUPLED. Un schéma de second ordre (SECONDE ORDER UPWIND) a été utilisé pour discrétiser les équations de quantité de mouvement et de l'énergie. Les facteurs de relaxation pour la pression, la densité, la vitesse et la viscosité turbulente sont respectivement de 0.75, 1, 0.75 et 1. Les critères de convergence pour les équations de continuité, de vitesse et d'énergie ont été vérifiés à chaque itération et ont été choisis comme résidus absolus de 10^{-5} , 10^{-5} et 10^{-8} , respectivement

3.7. Résultats et discussions

Comme nous l'avons mentionné avant, deux configurations seront simulées et analysées dans la présente étude. Les caractéristiques géométriques des deux configurations sont choisies comme suit :

$$H = 4 \text{ cm},$$

$$L_0 = 3.5 \text{ cm},$$

$$L = 20 \text{ cm},$$

$$D = 1 \text{ cm},$$

$$a = 1.25 \text{ cm},$$

Largeur de la conduite $L_\infty = \infty$.

Ce qui donne une porosité ε égale à :

$$\varepsilon = \frac{\text{Surface fluide}}{\text{Surface totale}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{L_0 \times H - \frac{8\pi D^2}{4}}{L_0 \times H} \Rightarrow \varepsilon = \frac{3.5 \times 4 - \frac{8\pi \times 1^2}{4}}{3.5 \times 4} \Rightarrow \varepsilon = 0.55, \quad (3.5)$$

et un diamètre équivalent (hydraulique) de la conduite plane égale :

$$H_{eq} = \frac{4 \text{ Section de passage}}{\text{périmètre}} \Rightarrow H_{eq} = \frac{4 H \times L_{\infty}}{2(H + L_{\infty})} \Rightarrow H_{eq} = 2H \Rightarrow H_{eq} = 8 \text{ cm}.$$

Pour simplifier nous avons divisé l'étude en cinq étapes :

Dans la première, on lance la simulation de l'écoulement à travers la conduite plane sans qu'elle soit remplie par n'importe quel type de milieu poreux, et ce afin d'évaluer la différence de pression (chute de pression entre l'entrée et la sortie de la conduite) qui génère l'écoulement pour une vitesse varie 1 et 100 m/s , ce qui correspond à un Nombre de Reynolds varie entre 5.48×10^3 et 5.48×10^5 . Aussi, dans cette étape l'écoulement est considéré isotherme c'est-à-dire l'équation de l'énergie ne sera pas tenue en compte et elle ne sera pas résolue.

Dans la deuxième étape, on lance la simulation du même l'écoulement à travers la même conduite plane, mais cette fois les tubes cylindriques seront placé au milieu duquel, c'est-à-dire on simule l'écoulement à travers la première configuration, voir figure 3.4a. Les mêmes vitesses d'écoulement seront considérées. Pour pouvoir évaluer la chute de pression résultante par le traversé du fluide par le milieu poreux, on doit calculer la chute de pression entre l'entrée et la sortie du fluide en en soustrayant la chute de pression calculée dans la première étape pour chaque vitesse. Bien sûr l'écoulement est considéré isotherme c'est-à-dire l'équation de l'énergie ne sera pas tenue en compte elle ne sera pas résolue. L'objectif de cette deuxième étape est d'évaluer les constante C_1 et C_2 qui sont caractéristiques intrinsèques du milieu poreux effectif, représenté par les tubes cylindriques. Et pour ce faire, on utilise le modèle mathématique suivante :

$$\Delta P = \mu L_0 C_1 \times V + \frac{\rho L_0}{2} C_2 \times V^2, \quad (3.6)$$

qui montre que la chute de pression suit un polynôme d'ordre deux en fonction de la vitesse. Ce polynôme est connu une fois les constantes C_1 et C_2 sont déterminées. Alors, on peut écrire :

$$\Delta P = A \times V + B \times V^2 \quad (3.7)$$

ou A et B sont des constantes qui peuvent être calculées en interpolant le couple des points calculés $(V_i, \Delta P_i)$. Par la suite les constantes C_1 et C_2 sont à déterminer telle que :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{A}{\mu L_0} & [1/m^2] \\ C_2 = \frac{2B}{\rho L_0} & [1/m] \end{cases} \quad (3.8)$$

La perméabilité intrinsèque du milieu poreux ' K ', peut être calculée en inversant la constante C_1 telle que :

$$K = \frac{1}{C_1} \quad [m^2]. \quad (3.9)$$

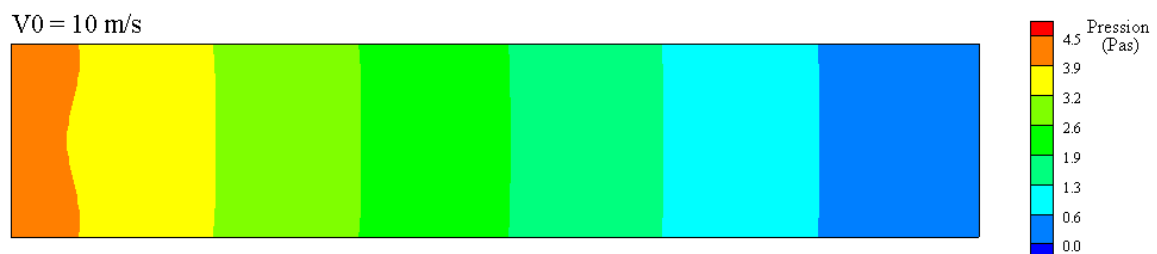
Dans la troisième étape, on lance la même simulation de l'écoulement à travers la même conduite plane, et les tubes cylindriques seront remplacés par un milieu poreux fictif, c'est-à-dire on simule l'écoulement à travers la deuxième configuration, voir figure 3.4b. Les mêmes vitesses d'écoulement seront considérées et les constantes C_1 et C_2 calculées dans l'étape précédente seront injectées pendant les calculs. Logiquement, la chute de pression résultante par le traversé du fluide par le milieu poreux fictif doit être la même que celle calculée dans la deuxième étape, ce valide les valeurs de C_1 et C_2 calculées dans l'étape deux et injectés dans trois.

Dans la quatrième étape, on simule l'écoulement à travers la première configuration, voir figure 3.4a. Les vitesses vont varier entre 1 et 100 m/s . Le phénomène thermique sera pris en compte par la mise en place d'une source de chaleur répartie uniformément à l'intérieur des tubes cylindriques, et le fluide à l'entrée de la conduite est considéré à températures constante T_0 . L'objectif de cette étape est calculer la température moyenne du fluide à la sortie de la conduite.

Dans la cinquième étape, on simule l'écoulement à travers la deuxième configuration ou le milieu poreux est fictif, Les mêmes vitesses, les même températures et la même source de chaleur seront considérées, et les constantes C_1 et C_2 calculées dans l'étape deux seront injectées pendant les calculs. L'objectif de cette étape est de bien comprendre la façon par laquelle le code du calcul AnsysFluent tient en compte la valeur de la porosité injectée pendant les calculs, et ce, en comparant la température du fluide à la sortie de la conduite calculée dans cette étape, avec celle calculé dans l'étape précédente dans les même conditions.

3.7.1. Ecoulement sans milieu poreux

Sur la figure (3.5a), on présente les contours de la pression à travers la conduite plane sans milieu poreux, et ce pour les vitesses $V_0 = 10, 50$ et $100 m/s$. on constate que la pression la plus élevée est localisée à l'entrée de la conduite et elle augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement, en effet, ce résultats est logique car l'écoulement du fluide ne peut pas se générer sans l'élévation de la pression du fluide à l'entrée. D'ailleurs, la variation de la pression suivant la direction transversale est négligeable le long de la conduite, parce qu'il n'y a pratiquement pas d'écoulement suivant cette direction.



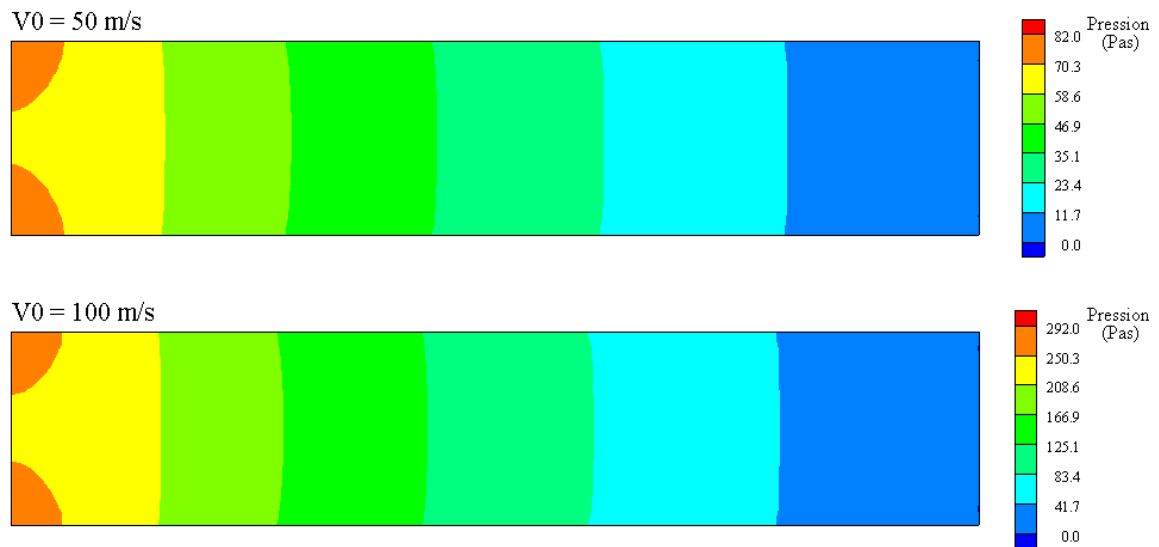


Fig. 3.5a : Contour de pression pour différentes vitesses d'entrée.

La figure (3.5b) montre la variation axiale de la pression du fluide le long du centre de la conduite pour différentes vitesses d'entrée, $V_0 = 20, 50, 80$ et 100 m/s . On remarque que la chute de pression du fluide traversant la conduite est linéaire, sauf à l'entrée où le profil de vitesse n'est pas encore totalement établi. Alors, en *grosso modo* on peut considérer cette variation comme quasi-linéaire.

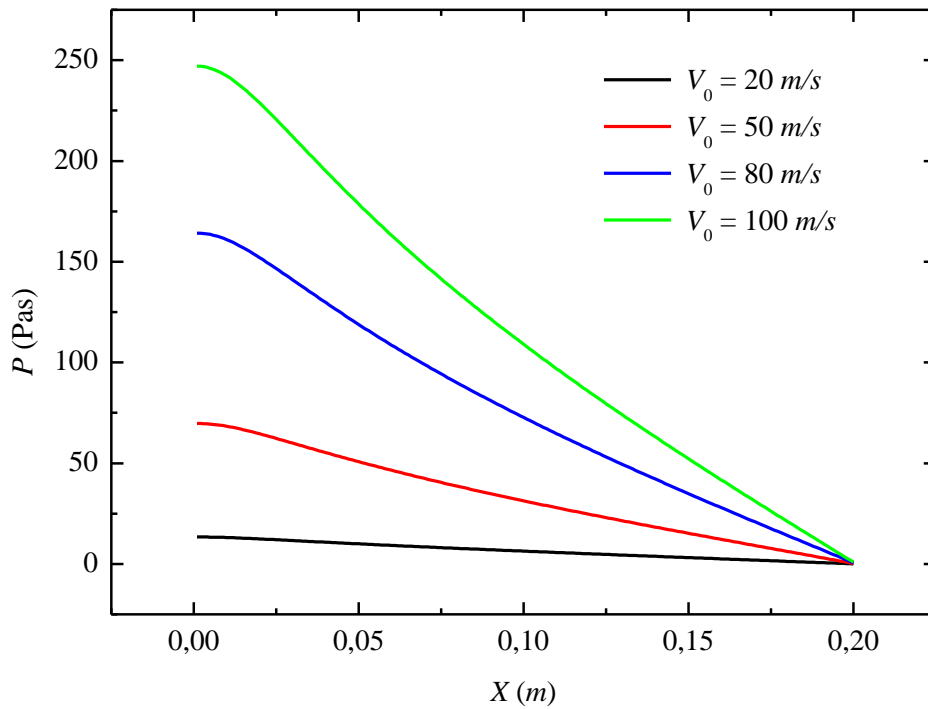


Fig. 3.5b : Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée.

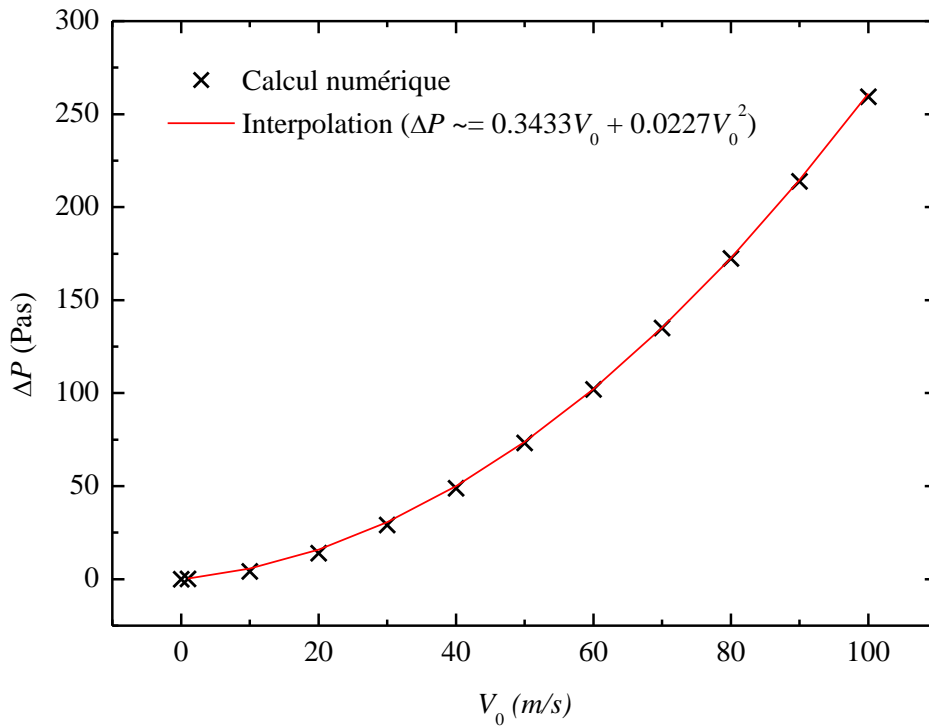
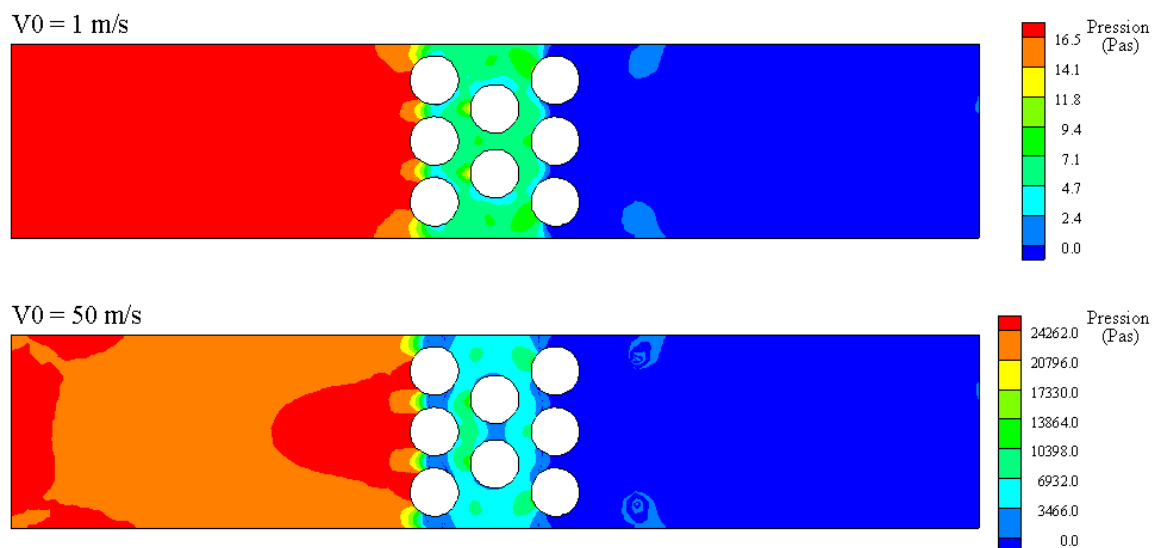


Fig. 3.5c : Evolution de la chute de pression en fonction de la vitesse d'entrée.

L'évolution de la chute de pression (différence de pression entre l'entrée et la sortie de la conduite) en fonction de la vitesse d'entrée est tracée sur la figure (3.5c). Cette figure montre que le déplacement (l'écoulement) du fluide est 100% lié au gradient de pression appliquée sur lui, vice versa. Pour un gradient de pression tend vers zéro, la vitesse tend aussi vers zéro, c'est-à-dire il n'y a pas d'écoulement. Aussi, il est bien clair que le gradient de pression augmente avec l'augmentation de la vitesse suivant une fonction qui peut se rapprocher par interpolation à une fonction parabolique (polynôme d'ordre 2).

3.7.2. Ecoulement avec milieu poreux effectif

Dans la figure (3.6a) est présentés les contours de la pression à travers la conduite plane partiellement remplie un milieu poreux effective, c'est-à-dire la première configuration, et ce pour les vitesses $V_0 = 1, 50$ et 100 m/s. on constate que le fluide subie une forte diminution de pression en traversant le milieu poreux (l'empilement des cylindres), et cette diminution est d'autant plus importante que la vitesse à l'entrée est plus élevée. En effet, l'augmentation de pression en amont du milieu poreux est nécessaire pour forcer l'écoulement du fluide à traverser la conduite quel que soit sa vitesse, et par conséquent assurer la continuité de l'écoulement et la conservation de la masse. Donc, si on veut que le fluide traverse le milieu poreux avec la vitesse désirée, on doit lui délivrer la pression adéquate en amont du milieu poreux.



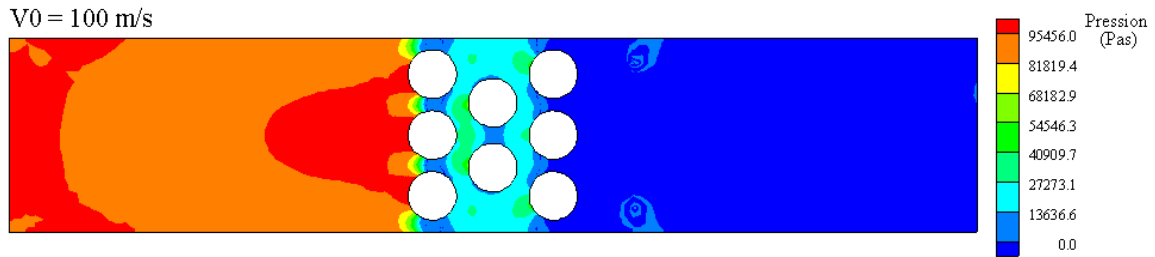


Fig. 3.6a : Contour de pression pour différentes vitesses d'entrée, première configuration. La figure (3.5b) présente la variation axiale de la pression du fluide le long du centre de la conduite pour différentes vitesses d'entrée, $V_0 = 20, 50, 80$ et 100 m/s . On remarque que la variation de pression du fluide traversant la conduite passe par trois phases distinctes : la première phase est celle qui est comprise entre l'entrée de la conduite et le milieu poreux. À travers cette zone le fluide subit une légère augmentation de pression en se rapprochant du milieu poreux qui tend à arrêter l'écoulement du fluide, ce qui transforme une partie de l'énergie cinétique (pression dynamique) du fluide en énergie potentielle (pression statique). La deuxième phase est délimitée par le milieu poreux lui-même (zone hachurée), et c'est dans cette zone que le fluide perd la totalité de son énergie potentielle par une chute de pression. En effet, la chute de pression à travers cette deuxième phase n'est pas vraiment linéaire, mais elle fluctue en dépendance de la forme du milieu poreux. La troisième phase est celle comprise entre le milieu poreux et la sortie de la conduite, où le fluide subit une légère décompression avant de sortir en reprenant la pression imposée à la sortie de la conduite.

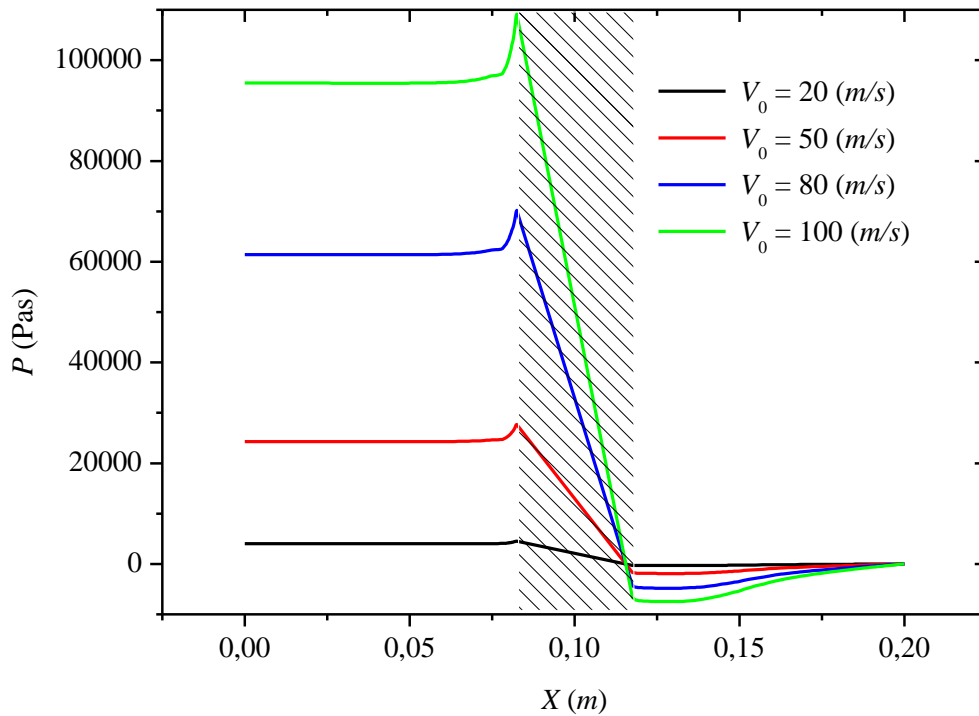
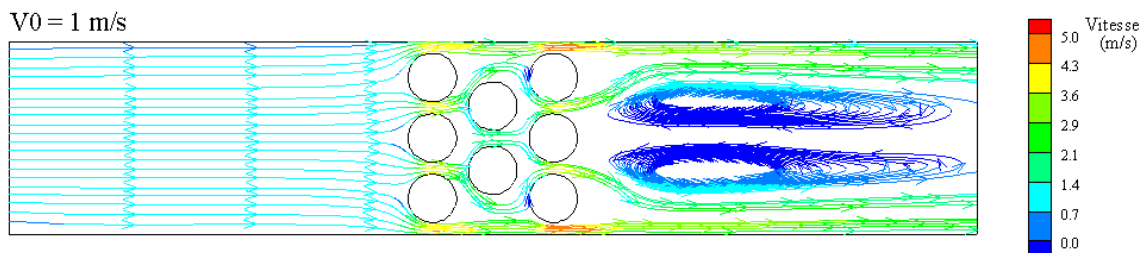


Fig. 3.6b : Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée.

Les lignes du courant colorées par le contour des vitesses sont présentées dans la figure (3.6c) pour différentes vitesses d'entrée, $V_0 = 1, 50$ et 100 m/s. Cette figure montre qu'à l'entrée de la conduite le fluide s'écoule en lignes parallèles et à une vitesse constante, jusqu'à l'arrivée au milieu poreux où il subit une déviation pour contourner la partie solide (les cylindres) et s'écouler à travers les pores (partie non solide). A cause de rétrécissement de section de passage le fluide doit augmenter sa vitesse locale pour assurer la continuité de l'écoulement, c'est ce qu'on appelle la vitesse superficielle dans les pores. Par ailleurs, le fluide en traversant ce milieu poreux subit une tortuosité qui varie entre 1, dans les zones proches des parois de la conduite, et 1.25 au milieu la zone poreuse.



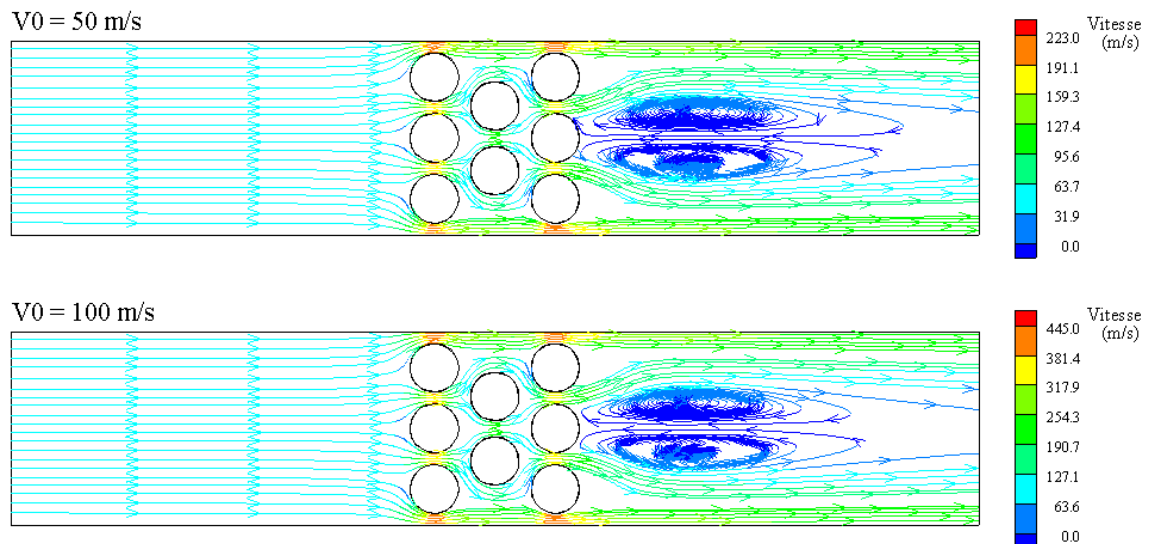


Fig. 3.6c : Lignes du courant colorées par le contour des vitesses pour différentes vitesses d'entrée.

Pour pouvoir évaluer la chute de pression résultante seulement par le traversé du fluide par le zone poreuse, la chute de pression le long de la conduite en en soustrayant la chute de pression calculée dans la première étape (voir figure 3.5c) est exposée dans la figure (3.6d). L'objectif principal de la figure (3.6d) est d'évaluer les caractéristiques intrinsèques du milieu poreux effectif qui sont les constante C_1 et C_2 . En analysant cette figure on conclut que la chute de pression suit un polynôme d'ordre deux en fonction de la vitesse d'entrée. Ce polynôme est facilement obtenu en faisant une interpolation polynomiale sur les deux points calculés pendant la simulation numérique. En effet, cette interpolation a donné le résultat suivant :

$$\Delta P = 15.8874 \times V + 9.3686 \times V^2 . \quad (3.9)$$

Alors, en basant sur les équations (3.6) et (3.7), on peut écrire :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{15.8874}{\mu L_0} \\ C_2 = \frac{2 \times 9.3686}{\rho L_0} \end{cases} . \quad (3.10)$$

d'où

$$\begin{cases} C_1 = 25367469.76 \text{ m}^{-2} \\ C_2 = 437.02 \text{ m}^{-1} \end{cases}$$

(3.11)

La perméabilité intrinsèque du milieu poreux peut être calculée en utilisant l'équation (3.8) et on obtient :

$$K = 3.942^{-8} \text{ m}^2.$$

(3.12)

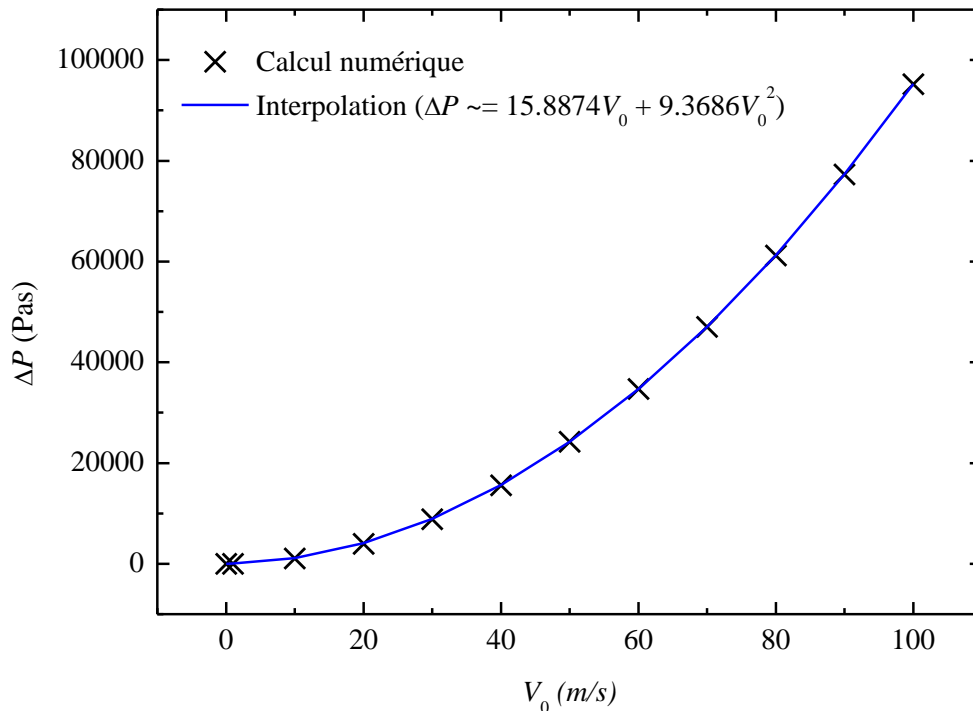


Fig. 3.6d : Evolution du gradient de pression en fonction de la vitesse d'entrée.

3.7.3. Ecoulement avec milieu poreux fictif

La figure (3.7a) présente les contours de la pression et de la vitesse pour une vitesse d'entrée $V_0 = 50 \text{ m/s}$, ou l'écoulement est simulé à travers la deuxième configuration. Les mêmes vitesses d'écoulement sont considérées et les constantes C_1 et C_2 calculées dans l'étape précédente seront injectées pendant les calculs. On constate la quasi-totalité de chute de pression prend place dans la zone poreuse. Et cette même zone le fluide garde la totalité de sa vitesse. Ce résultat logique parce que le gradient de pression assure l'écoulement à travers toute la conduite.

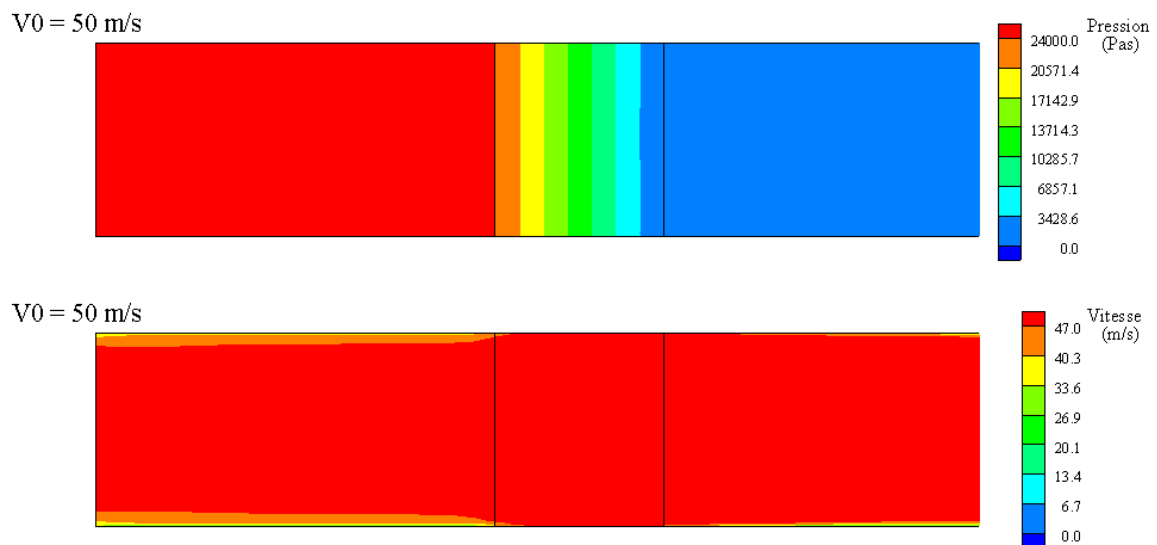


Fig. 3.7a : Contours de pression et de vitesse pour $V_0 = 50 \text{ m/s}$, deuxième configuration.

La variation de pression le long du centre de la conduite est présentée sur la figure (3.7b) pour différentes vitesses d'entrée, $V_0 = 20, 50, 80$ et 100 m/s . La pression du fluide traversant la conduite suit pratiquement la même allure que celle suivie par la pression pour la première configuration, voir figure (3.6b). Elle passe par les même trois phases distinctes, mais cette fois les variations de la pression dans la première est la dernière phase est inaperçue devant sa variation dans la deuxième phase qui est 100 % linéaire le long de la zone poreuse. En effet, quand on considère un milieu poreux fictif dans le code de calcul AnsysFluent, il le modélise comme une région totalement fluide (pas de solide) qui subit des pertes de pression visqueuse et inertielle. De manière générale, on peut considérer que le fluide se comporte de la même façon en traversant les deux configurations. Et pour se confirmer de ce résultat, nous avons comparé les chutes de pression obtenues à travers les deux configurations pour différentes vitesses d'entrée. Cette comparaison est exposée sur la figure (3.7c), où il se trouve que les courbes sont parfaitement superposées. Ce qui prouve d'un côté la validité des deux modèles que nous avons adoptés, et d'autre côté la validité de la méthode suivie pour le calcul des constantes C_1 et C_2 . En réalité il nous reste encore une dernière chose à faire avant de clôturer le sujet des constantes C_1 et C_2 , c'est l'évaluation de l'erreur relative et l'erreur absolue obtenues lors de la comparaison entre les deux configurations. Cette évaluation affichée sur la figure (3.7d) qui montre que l'erreur relative est importante pour les faibles vitesses et elle dépasse les 50 % pour $V_0 = 1 \text{ m/s}$, mais elle diminue au fur et mesure que la vitesse augmente,

et tombe au-dessous de 2 % pour une vitesse supérieure à 20 m/s . par ailleurs, si jette un coup d'œil sur l'évolution de l'erreur absolue on constate que cette dernière est moins importante pour les faibles vitesses et tend vers zéro pour $V_0 = 1 m/s$. Donc on conclusion, l'erreur relative est importante pour les faibles vitesses parce que elle est relative une faible pression, et elle ne prouve pas la faiblesse de la méthode suivie pour le calcul des deux constantes. En plus, dans tous les cas l'erreur absolue ne dépasse les pas les 200 Pas , ce qui montre donne un point d'appuis très solide justifiant notre approche.

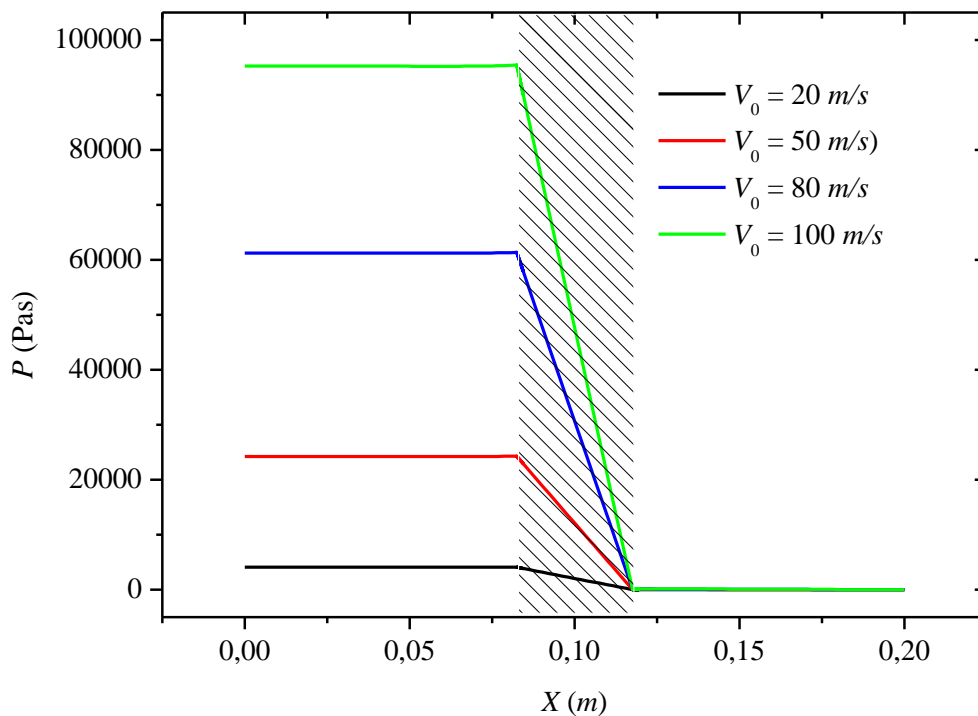


Fig. 3.7b : Variation de pression le long de la conduite pour différentes vitesses d'entrée, deuxième configuration.

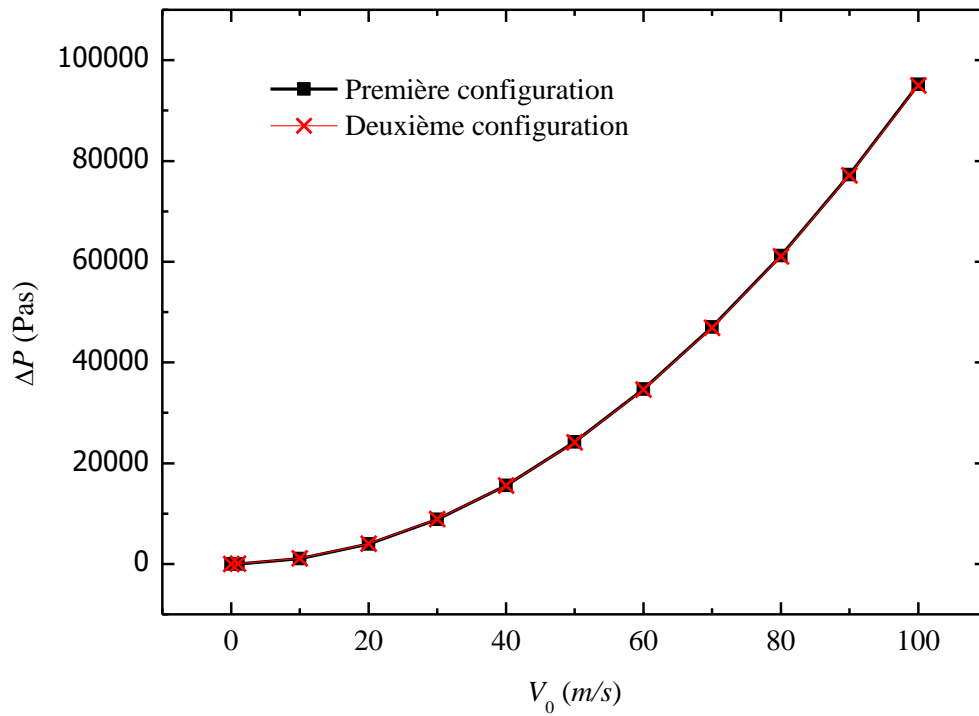


Fig. 3.7c : Comparaison de la chute de pression résultante des deux configurations.

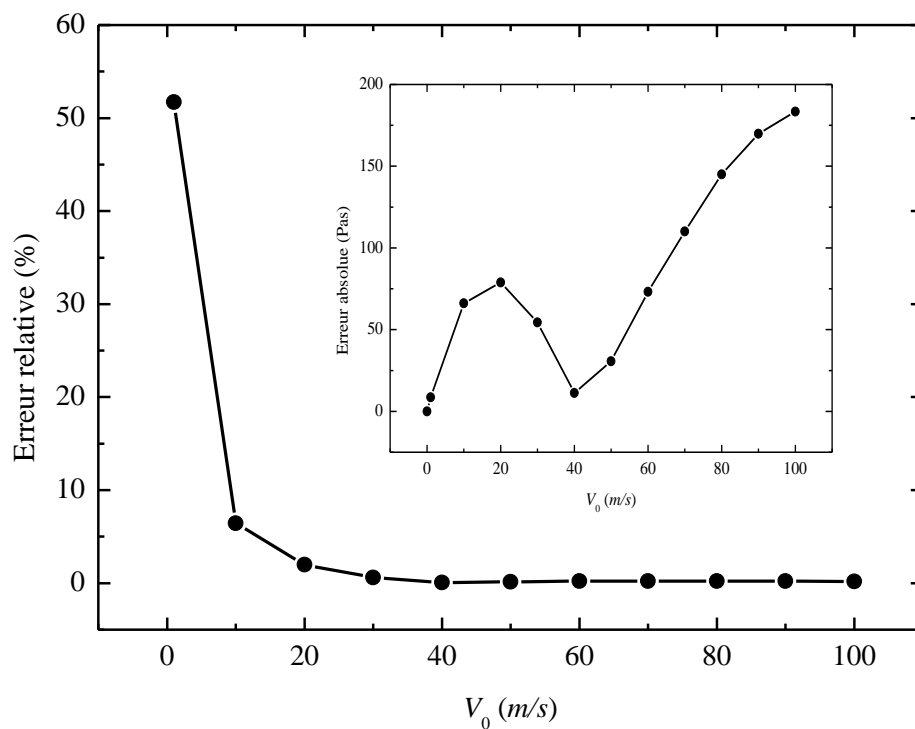


Fig. 3.7d : Evolution de l'erreur relative et l'erreur absolue sur la ΔP en fonction de V_0 .

3.7.4. Milieu poreux effectif avec source de chaleur

Dans la figure (3.8a) est présentés les contours de la température à travers la conduite la première configuration, et ce pour les vitesses $V_0 = 1, 50$ et 100 m/s . la température du fluide à l'entrée de la conduite est considéré à constante $T_0 = 300 \text{ K}$. une source de chaleur répartie uniformément à travers les tubes cylindriques est considérée à valeur constante $\Phi_0 = 10 \text{ MW/m}^3$. On constate que quel que soit la vitesse d'écoulement, la température la plus élevée est localisée à l'intérieur des cylindres, parce que ces dernières sont la source de la chaleur. El le cylindre le plus chaud est celui du milieu derrière l'écoulement, parce qu'il est en contact avec un fluide déjà chauffé en contactant les cylindres qui sont face de l'écoulement. D'autre coté, la température de chaque cylindre diminue avec l'augmentation de la vitesse qui engendre des échanges thermiques (fluide/solide) plus élevées par renouvellement plus rapide du fluide.

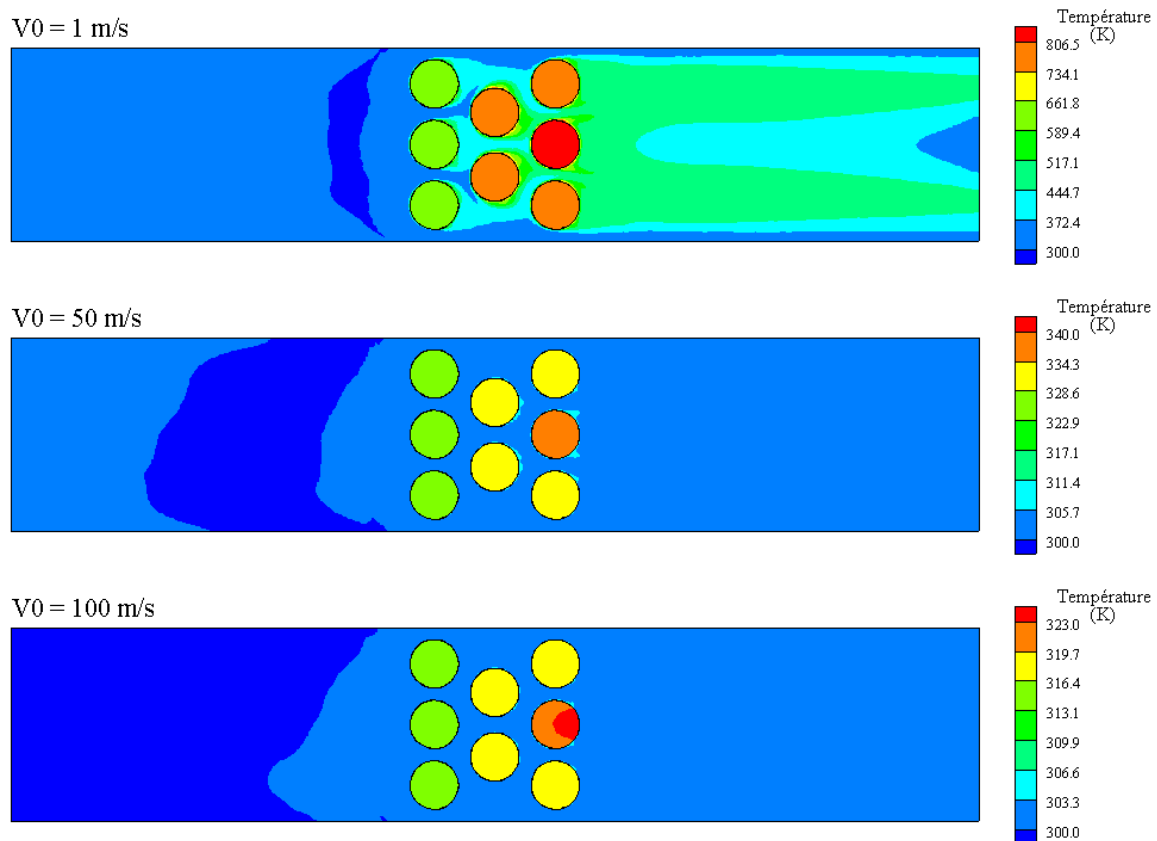


Fig. 3.8a : Contours de température pour différentes vitesses, $\Phi_0 = 10 \text{ MW/m}^3$, première configuration.

La figure (3.8b) présente la variation de la température du fluide à la sortie de la conduite en fonction de la vitesse d'entrée et pour une source de chaleur à l'intérieur des cylindres $\Phi_0 = 10 \text{ MW/m}^3$, et ce pour la première configuration. Il est bien clair que la température du fluide à la sortie diminue de façon monotone en augmentant la vitesse d'écoulement. En effet, et comme nous l'avant déjà discuté, une vitesse plus élevée signifie qu'un contact fluide/solide de durée moins courte va se produire, ce minimise les échanges thermiques et par conséquent minimise la température du fluide.

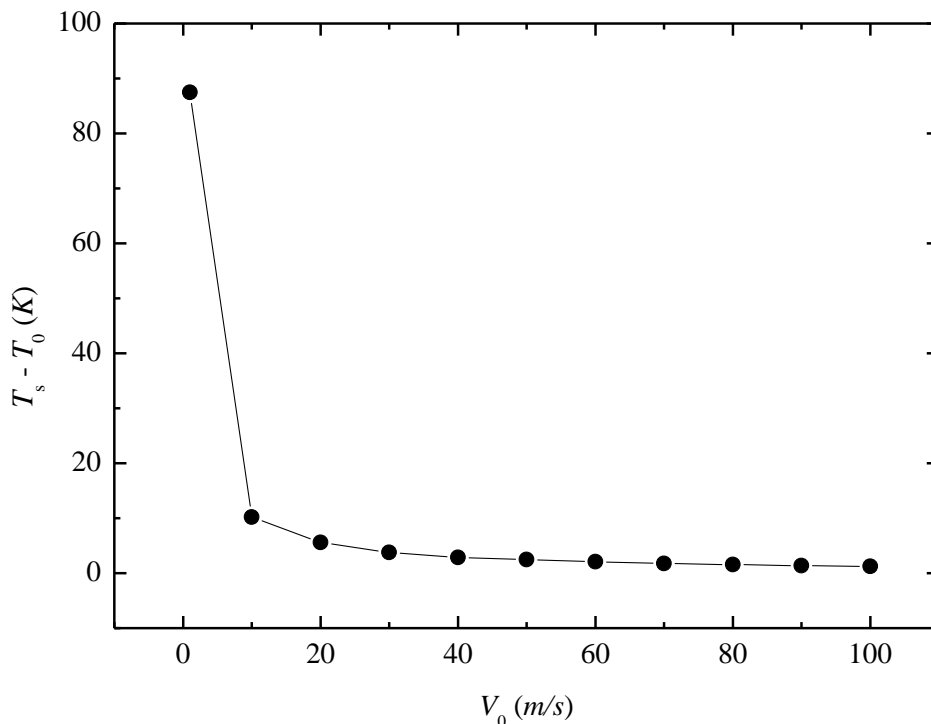


Fig. 3.8b : Variation de la température de sortie en fonction de la vitesse d'entrée, $\Phi_0 = 10 \text{ MW/m}^3$, première configuration.

3.7.5. Milieu poreux fictif avec source de chaleur

La figure (3.9a) présente les contours de la température pour une vitesse d'entrée $V_0 = 1, 50,$ et 100 m/s , ou l'écoulement est simulé à travers la deuxième configuration. Les mêmes vitesses d'écoulement sont considérées et les constantes C_1 et C_2 calculées dans l'étape deux sont injectées pendant les calculs. La source de chaleur à l'intérieur est de $\Phi = 0.45\Phi_0$. Pour cette deuxième configuration le code du calcul AnsysFluent considère que la source de chaleur est répartie uniformément sur toute la zone poreuse (solide et fluide). D'ailleurs, le fluide se réchauffe entièrement en traversant cette zone poreuse. C'est pour cette raison qu'on a pris en considération l'effet de la porosité du milieu poreux par la modèle mathématique suivant :

$$\Phi = (1 - \varepsilon) \Phi_0 .$$

$$\Rightarrow \Phi = 0.45 \Phi_0 .$$

Et pour se confirmer de cette modélisation, nous avons comparé les températures à la sortie de la conduite obtenues à travers les deux configurations et pour différentes vitesses d'entrée. Pour la deuxième configuration deux simulations ont été lancées ou ce modèle mathématique est considéré dans la première et négligé dans la deuxième. Cette comparaison est exposée sur la figure (3.7b), où il se trouve que les courbes des deux configurations se superposent parfaitement si on tient en compte l'effet de la porosité par le modèle ci-développé, et si la vitesse soit supérieure 2 m/s. pour le ou cas la porosité est négligée, les résultats des deux configurations sont ne se coïncident plus.

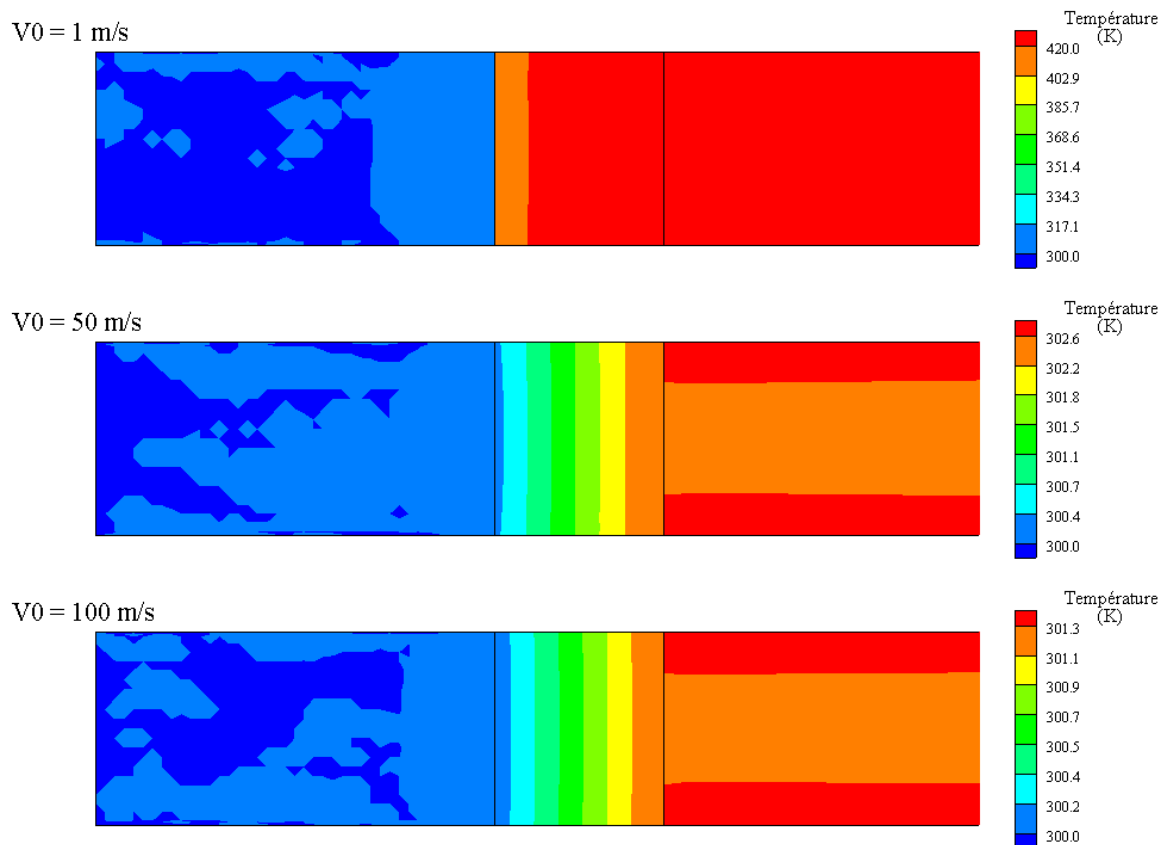


Fig. 3.9a : Contours de température pour différentes vitesses, $\Phi_0 = 4.5 \text{ MW/m}^3$, deuxième configuration.

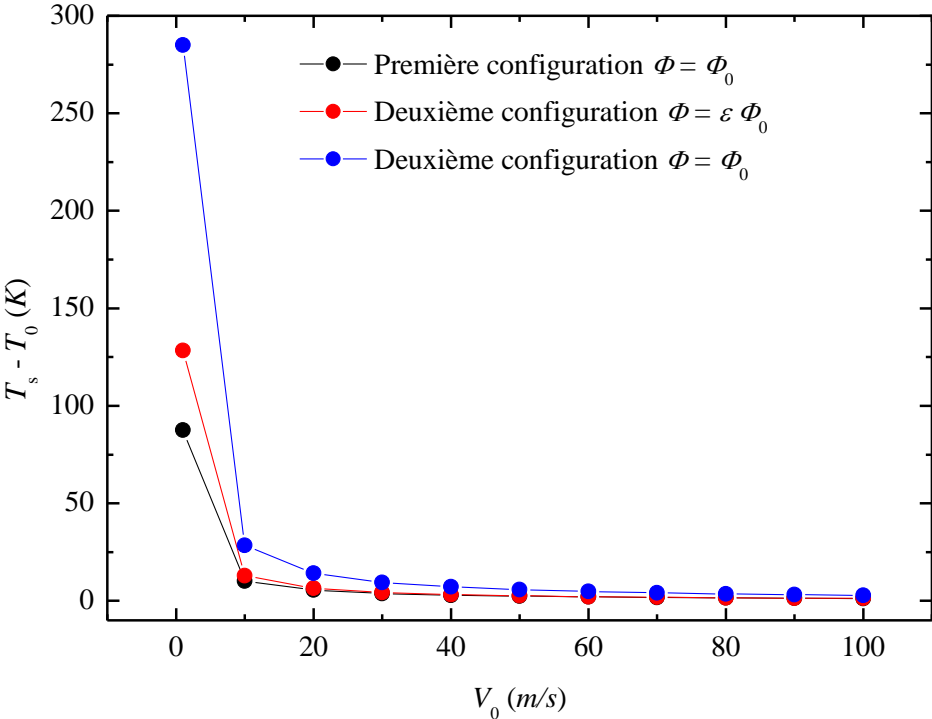


Fig. 3.9b : Comparaison de température de sortie résultante des deux configurations.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail une étude traitant le problème des écoulements à travers les milieux poreux dans une conduite plane. Le fluide caloporteur traverse la conduite en échangeant la chaleur avec le milieu poreux. Ce travail est composé de trois chapitres, le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique des principaux travaux effectués sur le sujet. Nous avons montré au cours de cette recherche l'intérêt du sujet à travers les nombreuses applications liées au phénomène des milieux poreux.

Le second chapitre, qui porte sur l'étude théorique des milieux poreux, est basé sur les connaissances les plus récentes et comprend une généralité sur les milieux poreux et sur la méthode avec laquelle ces milieux peuvent être modélisés dans les codes du calcul numérique.

Dans le troisième chapitre, une simulation en deux dimensions sous le code du calcul AnsysFluent est réalisée, et les résultats et les conclusions obtenus sont les suivants :

- Le sujet des milieux reste encore problème d'actualité vu le nombre et la nouveauté des publications réalisées dans ce domaine.
- La loi de Darcy, qui n'est valide que pour les écoulements à bas Reynolds, reste la base fondamentale pour la compréhension du comportement du fluide en traversant les pores du solide.
- Le fluide en passant par les pores perd de l'énergie potentielle (pression) sous forme de perte visqueuse et perte inertielle.
- Pour que le fluide puisse traverser le milieu poreux, il faut augmenter la pression en augmentant à chaque fois que la perméabilité diminue.
- Dans la plupart des codes du calcul numérique (CFD codes), les constantes intrinsèques du milieu poreux sont dépendantes de la perméabilité, bien que la porosité affecte sa conductivité thermique.
- La méthode numérique présentée dans ce travail pour le calcul des constantes C_1 et C_2 , montre une bonne consistance en regardant les résultats obtenus. En effet, cette méthode peut aussi être efficace si un chemin expérimental est suivi.

Références

- [1] DEAN W. R., «Note on the notion of fluid in a curved pipe », Science- Phil. Mg, S7, Vol. 4, N°20, (1927).
- [2] Abdelkrim Bouaffane : Etude hydrodynamique et thermique d'un écoulement en régime laminaire dans une conduite remplie par un milieu poreux. THÈSE de doctorat, université frères Mantouri Constantine faculté des sciences de la technologie département de génie mécanique, 2020.
- [3] Saoussene SLAMA. Ecoulement et Transfert de Chaleur dans un Canal Rempli d'un Milieu Poreux Anisotrope Saturé d'un Nano fluide et Soumis à un Chauffage Oscillatoire. Thèse de doctorat en Génie Mécanique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene ,2020.
- [4] Melle HARITI Nabila. Analyse thermique dans un échangeur de chaleur à double tube à écoulement à contre- courant avec insertion de matrices poreuses des deux côtés du tube intérieur. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, USTHB / Alger faculté de génie mécanique et se génie des procède, mémoire de magister. oct. 2005.
- [5] BOUMARAF Assia. Étude de la convection naturelle thermosolutale dans une enceinte rectangulaire inclinée. Mémoire de magister en génie mécanique. UNIVERSITÉ MENTOURI – CONSTANTINE FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR,2010.
- [6] Mohamed HAMIA, Analyse du transfert de chaleur dans un conduit courbé complètement poreuse. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene. Thème de master génie mécanique. juin, 2011.
- [7] Marcelo B. Saito, Marcelo J.S. de Lemos. Laminar heat transfer in a porous channel simulated with a two-energy equation model. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol 36, pp 1002–1007, 2009.
- [8] Pei-Xue Jiang, Ze-Pei Ren, and Bu-Xuan Wang. Numerical simulation of forced convection heat transfer in porous plate channels using thermal equilibrium and non-thermal equilibrium models. Numerical Heat transfer. Part A, vol 35, pp 99-113, 1999.
- [9] N. Rudraiah, P. K. Srimani et R. Friedrich, Finite amplitude convection in a two components fluid-porous layer. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 715-722 (1982).
- [10] V. Prasad et A. Tuntomo, Inertia effects on natural convection in a vertical porous cavity. Num. Heat Transfer, Vol. 11, pp. 295-320 (1987).
- [11] A. Bejan et D. Poulikakos, The non-Darcian regime for vertical boundary layer natural convection in porous medium. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27(5), pp. 717-722 (1984).
- [12] G. Lauriat and V. Prasad, Non-Darcian effect on natural convection in a vertical porous enclosure. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32(11), pp. 2135-2148 (1989).
- [13] Ramdane Younsi. SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE EN MILIEUX FLUIDES ET POREUX. Sciences de la Terre. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2002.
- [14] M.H. Matin and B. Ghanbari, Effects of Brownian motion and thermophoresis on the mixed convection of nanofluid in a porous channel including flow reversal, Transport in Porous Media, Vol. 101, pp. 115-136, 2014.
- [15] HAMZA CHERIF Othman. Les écoulements dans les milieux poreux partiellement saturant. Thème de Master En Génie Civil. Université De Tlemcen, 2013.

- [16] A. Hadim, 1994, Forced convection in a porous channel with localized heat sources, ASME J. Heat Transfer, 116, 465- 472.
- [17] M. K. Alkam et M. A. Al- Nimr, 1999, Improving the performance of double- pipe heat exchangers by using porous substrates, Int. J. Heat Mass Transfer, 42, 3609- 3618.
- [18] M. K. Alkam, M. A. Al- Nimr et M. O. Hamdan, 2001, Enhancing heat transfer in parallel- plate channels by using porous inserts, Int. J. Heat Mass Transfer, 44, 931- 938.
- [19] Pierre-Lou BILLEROT. Étude numérique de l'écoulement à froid et à chaud dans un brûleur poreux. Mémoire en génie aérospatial. Ecole de technologie supérieure université du québec, september 25, 2018.
- [20] Salah Chikh, Ali Boumediene, Khedidja Bouhadeif, Guy Lauriat. Heat transfer enhancement by porous substrate addition on the inner wall of a tubular heat exchanger. Revue Générale de Thermique, vol 36, pp 41-50, 1997.
- [21] Fatah Mejni : Structures synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux. Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]. Thèse de doctorat en Génie Mécanique .Université des sciences et technologies de lille, lille1,2008.Français.tel-00391122
- [22] Koschmieder E.L. & Pallas S.G., Heat transfer through a shallow, horizontal convecting fluid layer, Int. J. heat Mass Transfer, 17, 991-1002, (1974).
- [23] <https://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/content/g14-2012/theorie-des-milieus-poreux> .
Consulté le : 12.03.2022.
- [24] Massoud Kaviany, Principles of heat transfer in porous media, 2nd edition, Springer-Verlag New York, 1995.
- [25] Alexandre DELACHE : Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux : comparaisons avec l'expérience, 2005, Lille.
- [26] : Zahra NEFFAH. Analyse des Transferts Thermique et Massique d'un Fluide non-Newtonien en Régime Oscillatoire dans un Canal muni de Cloisons Poreuses. THÈSE de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.2018.