

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE NEWTONIEN ET NON NEWTONIEN EN MILIEU POREUX SATURE

EXPERIMENTAL STUDY OF NEWTONIAN AND NON-NEWTONIAN FLUID FLOW IN A SATURATED POROUS MEDIA

Abdoulaye Gueye¹, El Hadji Oumar Gueye¹, Sosse Ndiaye¹, Cheikh Mbow, Giovanni Malomar¹, Mahabdou Diouf¹, Kharouna Talla and Aboubaker Chedikh Beye^{1,2}

Résumé

La compréhension et la prédiction des processus d'écoulement et de transport dans un milieu poreux constituent une étape déterminante pour gérer les ressources en eau et assurer leur préservation. Cette communication présente un dispositif expérimental très simple d'étude sur l'écoulement de fluide newtonien et non newtonien dans un milieu poreux. Les résultats expérimentaux sont ensuite examinés à la lueur des théories établies. La loi de Darcy qui donne la relation linéaire entre le débit et le gradient hydraulique a été vérifiée. D'autres lois très importantes donnant la relation non linéaire entre le débit et le gradient hydraulique ont été aussi trouvées.

Mots clés : viscosité, fluide newtonien, fluide non newtonien, porosité, perméabilité

Abstract.

Dealing with the comprehension and prediction processes of water flow and their transport processes in a porous area represents an effective step in managing water resources and ensuring their preservation. On the one hand, this paper presents a very simple study on the flow of both the Newtonian and non-Newtonian fluid experimental device in a porous medium. On the other hand, experimental results are examined in the light of established theories. And therefore, Darcy's law which puts forward the linear relationship between the flow and the hydraulic gradient was verified. Moreover some other important laws which are giving the non-linear relationship between flow and hydraulic gradient were also found.

Key words: viscosity, Newtonian fluid, non-Newtonian fluid, porosity, permeability

¹ Groupe de Mécanique des Fluides et Applications (Laboratoire de Fluidique – Transferts thermique et de masse) Département de Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar / Sénégal B.P. 25114 Dakar – Fann Campus de l'UCAD / Avenue Cheikh Anta Diop – Dakar / SENEGAL ; author for correspondence : E-mail : gueye812003@yahoo.fr.

² Groupe de physique des solides et sciences des matériaux, Département de Physique-Faculté des Sciences et Techniques

1. Introduction

L'étude des écoulements de fluides en milieu poreux suscite, depuis de nombreuses années, de grands intérêts tant pour la communauté scientifique que pour les industriels. La gestion des ressources naturelles en eau, la géothermie, l'activité pétrolière, le stockage et l'entreposage de déchets radioactifs, le stockage souterrain de chaleur font partie des discussions rémanentes.

La plupart des études existantes traitant de l'écoulement à travers un milieu poreux d'un fluide newtonien en régime laminaire pour de faibles nombres de Reynolds ($R_e < 10$) sont basées sur le modèle de Darcy (Nield et Bejan [1]). Et de plus ces études supposent le caractère isotrope et homogène des matériaux poreux. Cette approche a ensuite été généralisée aux écoulements à plus grande vitesse, en introduisant un terme quadratique.

Ainsi, Ergun [2] a proposé une corrélation pour la perte de charge à travers un lit de sphères en fonction de sa porosité. Pour les écoulements bis ou tridimensionnels, cette approche empirique est appliquée dans la direction du gradient de la pression. On peut éventuellement tenir compte de l'anisotropie du milieu poreux en introduisant une perméabilité tensorielle. Il est également possible d'obtenir des équations similaires, incluant des termes d'inertie et de diffusion de la quantité de mouvement, en partant des équations de Navier-Stokes (valables sur l'espace offert à l'air) en effectuant une moyenne spatiale sur la phase fluide. On aboutit ainsi aux équations de Darcy-Forchheimer.

L'écoulement d'un fluide est principalement caractérisé par la charge de sa viscosité. Lorsque celle-ci reste constante et est indépendante de la contrainte de cisaillement appliquée par exemple ces fluides sont dits newtoniens. Pour les fluides non newtoniens, la viscosité dépend

de la force de cisaillement appliquée (Keslerová et al.[3]).

L'écoulement du fluide dépend fortement aussi des propriétés du milieu poreux caractérisé par deux paramètres importants: la porosité et la perméabilité.

La dépendance de la perméabilité du milieu poreux isotrope et homogène sur la géométrie du milieu est définie par la loi de Darcy. Une discussion approfondie des théories de l'écoulement en milieux poreux et des analyses d'équations mathématiques basées sur des hypothèses différentes peuvent être trouvée dans la littérature Nield et al.[4]; Straughan[5].

Beaucoup d'efforts sont fournis pour établir des relations entre la perméabilité et la porosité des deux types de fluides newtoniens et non newtoniens en milieu poreux. Pour les fluides non newtoniens, ces études comprennent un volume moyen (Shenoy [6]; Hayes et al.[7]) et l'utilisation de méthodes d'homogénéisation (Shah et al. [8]; Liu et al. [9]; Auriault et al. [10]).

Pour contribuer à la modélisation de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux, nous proposons dans ce travail un dispositif expérimental simplifié vérifiant la loi de Darcy pour un fluide Newtonien et un milieu poreux isotrope et homogène. Avec ce dispositif d'autres mélanges de fluides non Newtoniens seront utilisés pour décrire les mêmes lois obtenues par deux équipes de recherche (Yilmaz et al.[11]; Konstantinos et al.[12]).

1. Etudes réalisées sur l'écoulement en milieu poreux

Une manipulation sur l'écoulement du glycérol dans un milieu poreux formé de billes de verre de dimensions calibrées est proposée par E. Deleporte [13]. Il propose une expérience dans laquelle le milieu poreux constitué de billes de verre est installé dans une colonne de verre maintenue verticalement. Pour les billes de

diamètre 3 mm un débit $Q_1 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est trouvé et pour les billes de diamètre 2 mm un débit $Q_2 = 1.3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En supposant que la porosité est du même ordre de grandeur pour les deux types de billes, la perméabilité K est alors proportionnelle au carré du diamètre des pores, qui lui-même est proportionnel au diamètre des billes. On a donc $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}$. Or, pour les billes utilisées ici : $(R_1/R_2)^2 = (3/2)^2 = 2.25$. D'autre part, on mesure : $Q_1/Q_2 = 2.3$. On obtient un bon accord quantitatif. Un écart relatif de 2.19% est noté.

De même une étude expérimentale de l'écoulement de fluide Newtonien (eau distillée) et non-Newtonien (solution polyacrylamide avec des concentrations de 5 et 10 ppm) dans un milieu poreux (grès de Berea) est effectuée par l'équipe de N. Yilmaz (2009). Ils ont fait une étude comparative des caractéristiques de débit (tels que les pertes de pression, les débits et les coefficients de perméabilité) des écoulements de fluides newtonien et non-newtonien dans le milieu poreux. Deux pompes seringue (ISCO, modèle 260D) ont été utilisées pour livrer les liquides d'essai dans le système du dispositif expérimental. La chute de pression dans le système a été mesurée par les données du système d'acquisition (National Instruments) et transducteurs de pression (Sensotech, TJF modèle-2920-05). Le débit volumique a été mesuré par le système de collecteur de liquide avec une précision de $0,2 \text{ cm}^3$.

Une courbe linéaire du débit a été obtenue pour l'eau distillée (fluide newtonien). La perméabilité calculée pour l'eau distillée est dans la gamme des perméabilités suggérées par le fabricant (300 MD). La perméabilité de l'eau distillée est presque constante avec une variation de pression tel que prédit par les modèles précédents.

Par contre les courbes obtenues pour les solutions de polyacrylamide (fluides non

newtoniens) ont été jugées non linéaires, comme prévu. Elle peut être décrite par le modèle de loi de puissance:

$$Q = K \Delta P^n \text{ (Équation 1)}$$

Où Q est le débit volumique, ΔP la chute de pression et K la perméabilité. Les constantes K et n sont définis de façon empirique

D'autres études sur le comportement hydraulique de l'écoulement inertiel dans des milieux poreux ont été examinées expérimentalement par Konstantinos et son équipe (2009). Les données expérimentales indiquent que pour un large champ de vitesses, pour les milieux fracturés et grossiers, l'écoulement du fluide peut être décrit de façon adéquate, soit par la loi de Forchheimer (équation 2) ou la loi de Izbash (équation 3) (Wen et al. 2006 [14]; Panfilov et Fourar, 2006[15]). Dans un modèle unidimensionnel, ces équations s'écrivent sous la forme :

$$\frac{\Delta H}{L} = \alpha V + \beta V^2 \text{ (Équation 2)}$$

$$\frac{\Delta H}{L} = \lambda V^m \text{ (Équation 3)}$$

où V est la vitesse d'écoulement du fluide, H la hauteur piézométrique et α, β, λ et m sont des coefficients.

Les deux termes de droite de l'équation (2) représentent la perte d'énergie par mécanismes visqueux et inertiels. Dans l'équation (3), l'exposant dépend du régime d'écoulement (pour $m = 1$, le régime est laminaire et pour $m = 2$ nous avons un écoulement turbulent), et λ est un coefficient de résistance généralisée. Alors que le contexte théorique de l'équation de Forchheimer (équation 2) est bien établie (Panfilov et al.[15]), l'équation d'Izbash (équation 3) est plutôt de nature empirique. Toutefois, si l'on suppose que les

coefficients phénoménologiques λ et m sont constants, la solution de l'équation (2) offre certains avantages techniques (When et al.[14]).

Pour de nombreux problèmes pratiques, il n'est pas possible de déterminer directement les coefficients α et β de l'équation (2) expérimentalement, donc des relations empiriques doivent être utilisés. Les coefficients de l'équation (2) sont calculés en fonction du diamètre des particules et la porosité moyenne (Sidiropoulou et al.[16]).

Selon Sidiropoulou et al.[16], les relations les plus fiables sont celles proposées par Ergun[2], Ward[17], Kovacs [18]et Kadlec et al. [19]. Ward [17] a analysé les données expérimentales plus de vingt différents milieux poreux, et a suggéré les équations suivantes pour l'estimation de α et β :

où d est le diamètre d'un grain ; g est l'accélération de la pesanteur.

$$\alpha = \frac{360\nu}{gd^2} \quad \beta = \frac{10.44}{gd}$$

2. Dispositif expérimental

Nous proposons une expérience très simple inspirée du modèle de Deleporte[13] . Dans ce dispositif le milieu poreux est installé

dans une colonne de verre (colonne chromatographique) maintenue verticalement (voir figure 1). La chute de pression est maintenue constante et le débit volumique est mesuré.

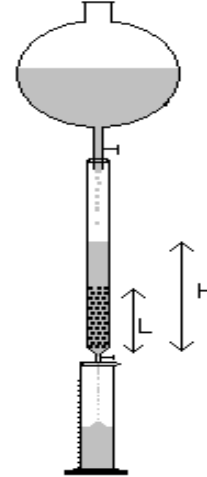


Figure 1 : Dispositif expérimental

Le fluide utilisé est stocké dans un ballon en verre qui sert de réservoir. On fait couler le fluide dans la colonne remplie de billes en plexiglas de diamètres calibrés 0,7 mm et 1 mm empilées sur une hauteur L. Pour maintenir les billes dans la colonne, on les cale avec un petit morceau d'éponge Scotch-Brite coincé au fond de la colonne. On vérifie que le débit volumique à travers la colonne n'est pas modifié par la présence de ce petit morceau de Scotch-Brite.

Tableau I : Caractéristiques des fluides.

Fluides	Masse volumique ρ ($kg.m^{-3}$)	Viscosité dynamique μ ($\times 10^{-3} Pa.s$)	Viscosité cinématique ν ($\times 10^{-6} m^2.s$)
F ₁ :80% essence + 20% huile	860	27	31,4
F ₂ :50% essence + 50% huile	848	50	59
F ₃ : Castrol ATF TQ DIII	844	63	74,64
F ₄ : Huile moteur 2T	850	89	104,7
F ₅ : Temoil 2T	864	145	167,82

Tableau II : nomenclature des milieux poreux

Diamètre des grains	$d_1 = 0,07cm$	$d_2 = 1cm$
Milieu poreux	M_1	M_2

Cinq fluides sont utilisés en faisant des mélanges entre l'essence et l'huile. La viscosité de chacun de ces fluides a été mesurée par un viscosimètre portatif.

Dans cette manipulation, on veut maintenir la chute de pression constante. Il faut alors que le niveau du fluide utilisé soit constant pendant le temps de la manipulation : on règle le débit de fluide sortant de l'ampoule de façon à ce que le fluide affleure le niveau fixé pendant tout le temps de la manipulation : le débit volumique à la sortie de l'ampoule est alors égal au débit volumique à la sortie de la colonne.

Les billes sont remplies jusqu'à une hauteur $L = 20$ cm dans la colonne de section $A = 18,15$ cm². On s'assure que le milieu poreux est bien saturé et qu'il ne reste plus de bulles d'air dans la colonne. Le principe consiste à mesurer le débit de fluide qui traverse le milieu poreux pour des charges variables. Le débit est calculé en utilisant une éprouvette graduée et un chronomètre. L'éprouvette graduée nous permet d'avoir le volume de fluide obtenu après un temps d'écoulement fixé. Le débit correspond au

rapport entre le volume de fluide récupéré et le temps fixé.

3. Résultats et discussions

On observe une variation du débit avec le gradient hydraulique (figure 2), la courbe de débit en fonction du gradient hydraulique étant non linéaire. On constate que le débit volumique pour un milieu poreux donné augmente avec le gradient hydraulique. Nous tentons de la décrire par le modèle de loi en puissance selon l'équation 3 :

$$Q = A \left(\frac{\Delta H}{L} \right)^n \text{ (équation 3)}$$

Ce qui est prévisible car pour une porosité donnée, la perméabilité varie comme le carré du diamètre des billes en plexiglas : la chute de pression pour un débit donné augmente (ou encore le débit pour une chute de pression donnée diminue) très rapidement lorsque la taille des pores décroît même si le volume poreux total reste constant.

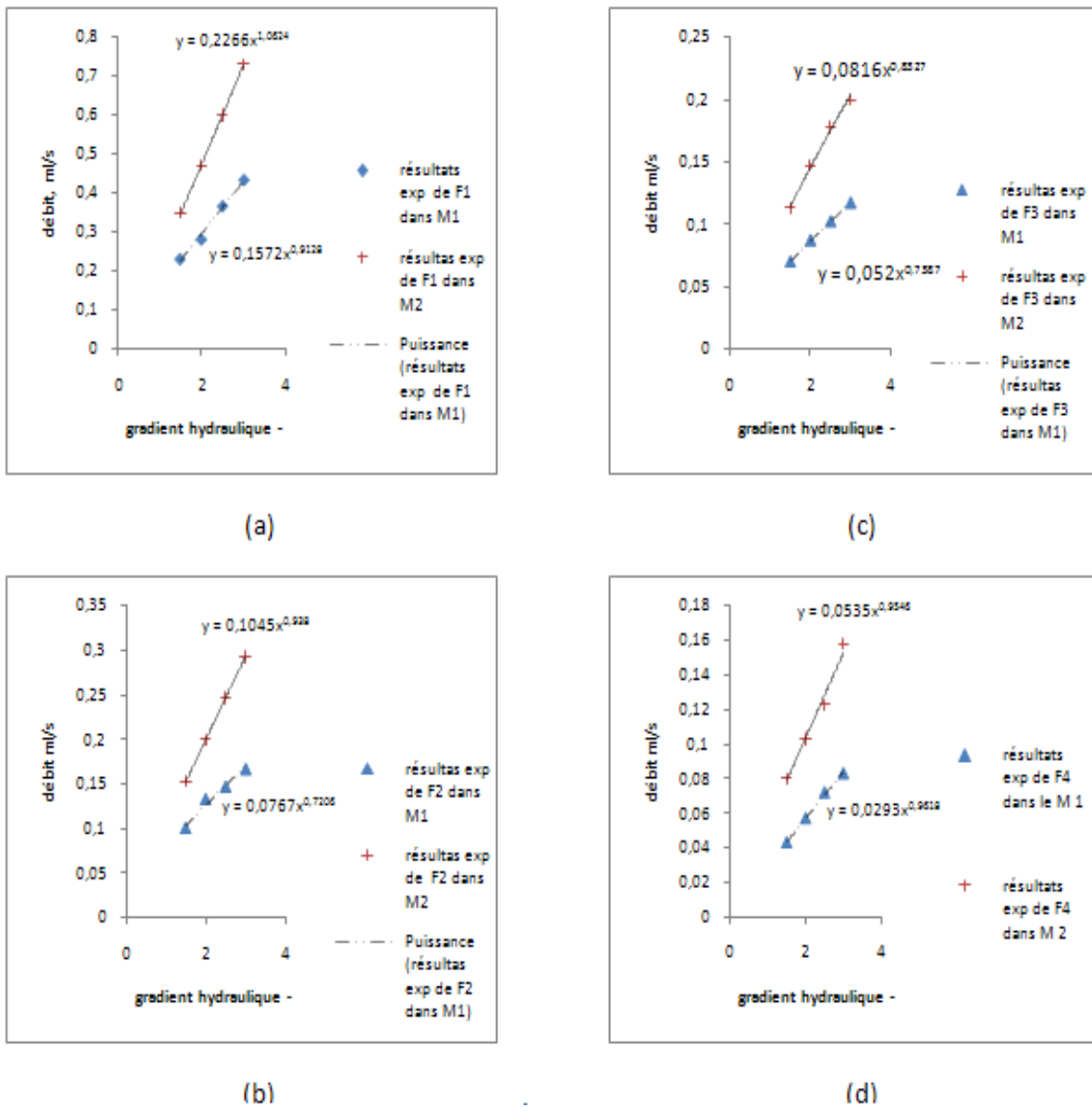


Figure 2 : Variation du Débit en fonction du gradient hydraulique : (a) Fluide F₁ dans le milieu poreux M₁ et M₂ ;(b) Fluide F₂ dans le milieu poreux M₁ et M₂ ; (c) Fluide F₃ dans le milieu poreux M₁ et M₂ ; (d) Fluide F₄ dans le milieu poreux M₁ et M₂

On peut retrouver l'expression de Darcy

$$Q = K \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \quad (\text{équation 4})$$

en considérant que

$$K = A \left(\frac{\Delta H}{L} \right)^{n-1} \quad (\text{équation 5})$$

La perméabilité des deux milieux poreux est calculée. On trouve pour les billes de

diamètre 0,7 mm une perméabilité égal a $K_1 = 3,26.10^{-3} \pm 0,38.10^{-3} m^2$ et pour les billes de diamètre 1mm une perméabilité égal à $K_2 = 5,20.10^{-3} \pm 0,61.10^{-3} m^2$.

Si on suppose que la porosité est du même ordre de grandeur pour les deux types de billes, K est alors proportionnel au carré du diamètre des pores, qui est lui même proportionnel au diamètre des billes. On a alors :

Or pour les billes utilisées ici :
 $(R_1/R_2)^2 = 0,490 \pm 0,121$. D'autre part, le rapport $K_1/K_2 = 0,626 \pm 0,147$. On

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}$$

obtient un bon accord quantitatif. Un écart relatif de 25% est par contre noté entre le rapport de $(R_1/R_2)^2$ et K_1/K_2 . Cet écart peut être dû à la déformation de la matrice poreuse lors des expériences. Car la déformation de la matrice poreuse entraîne

On voit bien que la perméabilité du milieu dépend fortement du fluide qui le traverse.

Pour chaque milieu poreux différents fluides ont été utilisés. On regarde l'influence de la viscosité du fluide sur son écoulement dans le milieu poreux (Figure 3). Le débit volumique en fonction du gradient hydraulique diminue quand la viscosité du fluide traversant le milieu poreux augmente.

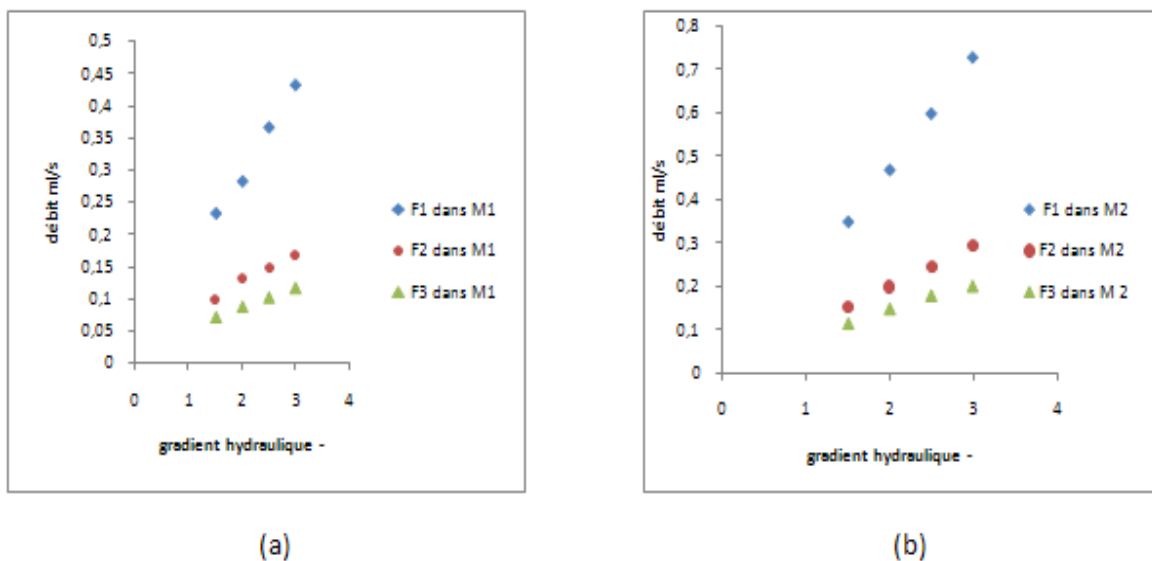


Figure 3 : Evolution du débit en fonction du gradient hydraulique de trois fluides de viscosité différente : (a) Dans le milieu poreux M₁ ; (b) Dans le milieu poreux M₂.

le changement de la perméabilité. L'écart peut s'expliquer aussi par les dimensions du cylindre utilisé. Darcy avait utilisé un cylindre où les effets de bord étaient négligés. Il nous faudra faire cependant d'autres expériences avec des cylindres de diamètre différents.

Sur les figures 4 et 5, l'écoulement des fluides F₁ et F₂ respectivement dans le milieu poreux M₁ et M₂ peut être convenablement décrit soit par la loi de Forchheimer ou par celle d'Izbash (When et al.[14]; Panfilov et al. [15]).

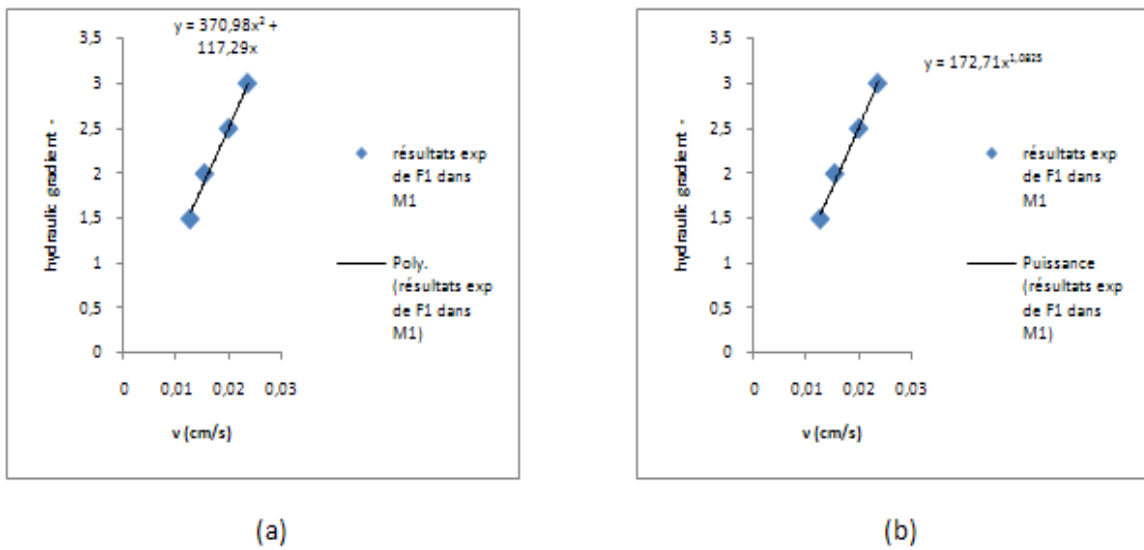


Figure 4 : Rapprochement des résultats expérimentaux de l'écoulement de F₁ dans M₁ par : (a) la loi de Forchheimer ; (b) la loi de Izbash.

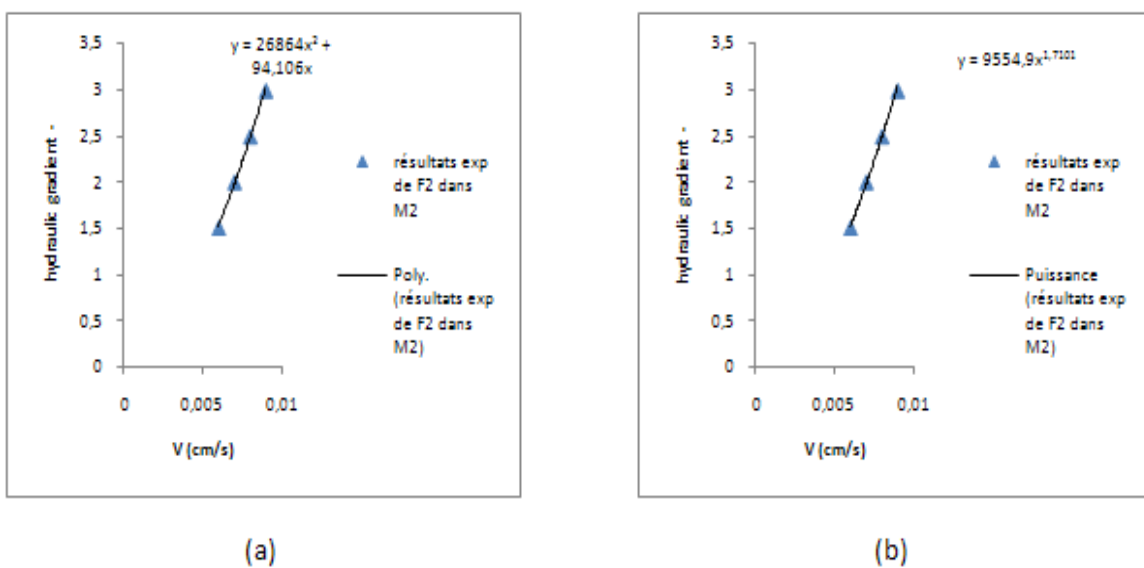


Figure 5 : Rapprochement des résultats expérimentaux de l'écoulement de F₂ dans M₂ par : (a) la loi de Forchheimer ; (b) la de Izbash

5. Conclusion

Les études expérimentales de l'influence de la viscosité d'un fluide en écoulement dans un milieu poreux saturé ont été réalisées en utilisant un dispositif expérimental très simple. Nos résultats préliminaires très intéressants montrent que la méthodologie choisie est bonne. Cependant, pour aborder une étude détaillée et systématique, des améliorations de ce dispositif sont

nécessaires pour permettre de contrôler toutes les propriétés physiques et mécaniques, du fluide et de la matrice poreuse.

6. Bibliographie

- [1] Auriault, J.L., Royer, P., Geindreau, C. Filtration law for power-law fluids in anisotropic porous media.

- International Journal of Engineering Science, (2002), **40**, 1151–1163.
- [2] Deleporte E., Ecoulement dans les milieux poreux – loi de Darcy Proposition d’expérience, le 21 mai (2003). ‘Hydrodynamique physique’, E. Guyon, CNRS Editions.
- [3] Ergun S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress (1952); 48: 89-94.
- [4] Hayes R.E., Afacan A., Boulanger B., Shenoy A.V., Modelling the flow of power law fluids in a packed bed using a volume-averaged equation of motion. Transport in Porous Media, (1996), **23**, 175–196.
- [5] Kadlec H.R., Knight L.R. Treatment Wetlands. Lewis Publishers, (1996).
- [6] Keslerová R., Kozel K., (2010), Numerical modeling of incompressible flows for Newtonian and non-Newtonian; Math. Compt. Simul.,doi:10. 1016/j.matcom. (2009).12.005.
- [7] Konstantinos N. M., Ioannis N.E.P., Vassilios A. T. Experimental investigation of inertial flow in porous media. Journal of Hydrology, (2009), **374**, 242-254.
- [8] Kovács G., (1981). Seepage Hydraulics, Development in Water Sciences. Elsevier, NY.
- [9] Liu S., Masliyah J. On non-Newtonian fluid flow in ducts and porous media. Chemical Engineering Sciences (1998), **53**, 1175–1201.
- [10] Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. Springer, Berlin, (1999).
- [11] Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. USA: Springer – Verlag; (1992)
- [12] Panfilov M., Fourar M. Physical splitting of non-linear effects in high-velocity stable flow through porous media. Advances in Water Resources, (2006), **29**, **1**, 30 – 41
- [13] Shah C.B., Yortsos Y.C., Aspects of flow of power-law fluids in porous media. A.I.Ch.E. Journal, (1995), **41**, 1099–1112.
- [14] Shenoy A.V. Non-Newtonian fluid heat transfer in porous media. Advances in Heat Transfer (1994), **24**, 101–190.
- [15] Sidipoolou M.G., Moutsopoulos K.N., Tsihrintzis V.A. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. Hydrological Processes, (2007), **2**, 115, 193-209.
- [16] Straughan B., (2008). Stability and Wave Motion in Porous Media. Springer, Berlin.
- [17] JWard J.C. Turbulent flow in porous media. Journal of Hydraulic Division – ASCE 90, (1964), **5**, 1-12.
- [18] When Z., Huang G., Zhan H. Non-Darcy flow in a single vertical fracture toward a well. Journal of Hydrology, (2006), **330**, 698-708.
- [19] Yilmaz N. and al. Experimental investigation of Newtonian and non-Newtonian fluid flows in porous media. Mechanics Research Communications, (2009), **36**, 638-641.