



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Détermination expérimentale des paramètres équivalents d'un milieu poreux hétérogène en écoulements uniforme ou radial

Charles Danquigny, Philippe Ackerer*

Institut de mécanique des fluides et des solides, UMR 7507, université Louis-Pasteur–CNRS, 2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

Reçu le 16 juillet 2004 ; accepté après révision le 4 janvier 2005

Disponible sur Internet le 8 mars 2005

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Des essais de traçage sont réalisés au laboratoire avec un milieu poreux hétérogène ayant une distribution 3D aléatoire et corrélée des perméabilités. L'ajustement de modèles numériques fournit les valeurs de perméabilités équivalentes et de macrodispersivités caractérisant un milieu homogène 2D horizontal. Différents types d'écoulement sont analysés : uniforme, radial et en doublet. L'ordre de grandeur des paramètres obtenus est indépendant du type d'écoulement, sauf en configuration du doublet. Les valeurs sont plus élevées que celles prédites par les théories stochastiques, à cause du faible nombre d'échelles intégrales parcourues par le traceur et l'extension limitée du modèle expérimental de laboratoire. *Pour citer cet article : C. Danquigny, P. Ackerer, C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Experimental determination of equivalent parameters of a heterogeneous porous medium under uniform or radial flow. Tracer tests are carried out in a heterogeneous porous medium that has a 3D correlated random distribution of the permeabilities. The fitting of numerical models provides the values of equivalent permeability and macrodispersivity characterizing a 2D homogeneous horizontal medium. Different flow configurations are studied: uniform, radial and pump and treat (doublet). The fitted parameter sets are independent of the flow type, except for the doublet. They are greater than the values predicted by stochastic theories, due to the small number of correlation lengths explored by the tracer and the limited extension of the experimental set-up. *To cite this article: C. Danquigny, P. Ackerer, C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Milieux poreux ; Paramètres équivalents ; Expériences ; Théories stochastiques

Keywords : Porous media; Equivalent parameters; Experiments; Stochastic theories

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : ackerer@imfs.u-strasbg.fr (P. Ackerer).

1. Introduction

L'étude des écoulements souterrains et du transport de matière repose sur une description des processus et du milieu à de nombreuses échelles liées aux appareils et méthodes de mesure, à la discrétisation spatiale nécessaire aux modèles numériques et aux hétérogénéités du réservoir [3,15]. Ainsi, les paramètres hydrodynamiques et de transport tels que la perméabilité et la dispersivité doivent pouvoir être évalués aux échelles pertinentes.

De nombreux travaux théoriques récents [15,17] traitent de l'estimation des paramètres équivalents à partir d'une description stochastique des conductivités hydrauliques du milieu naturel, dans un domaine suffisamment étendu pour y inclure plusieurs longueurs de corrélation ou échelles « intégrales » caractérisant la covariance de la distribution de la log-conductivité hydraulique. Cependant, dans de nombreux cas de contamination des aquifères alluviaux, la zone polluée n'est pas assez étendue pour intégrer un nombre suffisant d'échelles intégrales. Il est alors légitime de se demander si de tels outils peuvent être encore appliqués dans de telles situations.

Le travail de recherche présenté dans cette communication se place dans cette configuration. Son but est d'estimer la perméabilité et la dispersivité d'un milieu homogène équivalent (c'est-à-dire que, soumis aux mêmes conditions aux limites, le milieu « restitué », en moyenne, les variables observées) à partir d'essais de traçage menés en milieu hétérogène. Ces essais sont conduits au laboratoire, ce qui présente de nombreux avantages par rapport aux essais de terrain [8, 19] : les mesures sont plus précises et moins coûteuses, les phénomènes non souhaités sont évités, plusieurs échelles d'observation sont possibles, l'hétérogénéité du milieu, les conditions aux limites et initiales sont bien connues et maîtrisées et les expériences peuvent être répétées assez facilement. L'approche expérimentale a été préférée à l'approche numérique, qui, elle aussi, comporte plusieurs difficultés (essentiellement de stabilité et/ou de diffusion artificielle) et qui repose souvent sur des approximations du même ordre que les théories stochastiques (développement à l'ordre 1).

Le support théorique aux expériences réalisées est présenté dans la première partie. La méthodologie expérimentale et les résultats expérimentaux sous différents types d'écoulements (uniforme et radial) font

l'objet de la deuxième partie. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats théoriques présentés dans la première partie.

2. Quelques résultats théoriques

Le calcul de la perméabilité équivalente a fait l'objet de plusieurs travaux de synthèse [15,17,20]. Ils concernent surtout les régimes d'écoulement uniforme et, plus récemment, les écoulements radiaux [9,13,18].

Pour les écoulements uniformes, de nombreux auteurs ont vérifié que la perméabilité effective K_{eff} est toujours comprise entre les bornes de Wiener, c'est-à-dire la moyenne arithmétique K_a et la moyenne harmonique K_h des perméabilités locales :

$$K_h \leq K_{\text{eff}} \leq K_a \quad (1)$$

La moyenne arithmétique caractérise la perméabilité équivalente des mailles en parallèle par rapport à la direction de l'écoulement moyen et privilégie les perméabilités locales élevées, tandis que la moyenne harmonique caractérise la perméabilité équivalente des mailles en série, par rapport à la direction de l'écoulement moyen et privilégie les faibles perméabilités.

Cette inégalité (1) est à l'origine de plusieurs études dont le but est de mieux borner la perméabilité équivalente et de proposer une formulation pour le calcul de celle-ci. Citons les bornes de Cardwell et Parsons [2] :

- la moyenne arithmétique des moyennes harmoniques des perméabilités locales calculées sur l'axe parallèle à l'écoulement principal (selon x) pour la borne inférieure $K_{\text{C.P. min}}$:

$$K_{\text{C.P. min}} = \mu_a^z(\mu_a^y(\mu_h^x)) \quad (2)$$

- la moyenne harmonique des moyennes arithmétiques des perméabilités locales calculées pour chaque plan perpendiculaire à l'écoulement principal pour la borne supérieure $K_{\text{C.P. max}}$:

$$K_{\text{C.P. max}} = \mu_h^x(\mu_a^y(\mu_a^z)) \quad (3)$$

Matheron [12] propose une moyenne pondérée des bornes de Wiener comme approximation au premier ordre de la perméabilité effective dans la direction u :

$$K_{\text{eq}}^{uu} = K_a^{\alpha_u} K_h^{(1-\alpha_u)} \quad \text{avec } \alpha_u \in [0, 1] \quad (4)$$

Ababou [1] exprime α en fonction de la dimension de l'espace d (1, 2 ou 3), de la longueur de corrélation dans la direction u considérée l_u et de la moyenne harmonique des échelles intégrales :

$$\alpha_u = \frac{d - l_h/l_u}{d} \quad (5)$$

Les théories stochastiques [4,16] conduisent à une expression de la conductivité K_e pour les faibles variances de la logconductivité :

$$K_e = K_G \left[1 + \sigma_Y^2 \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) \right] \quad (6)$$

avec K_e la conductivité effective [L/T], K_G la moyenne géométrique des conductivités [L/T] et σ_Y^2 la variance de $Y = \ln(K)$. En tenant compte du coefficient d'anisotropie e défini par le rapport des longueurs de corrélation verticale et horizontale, γ peut être calculé de la façon suivante [4] :

$$\gamma = \frac{\lambda}{2} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{e^2}{1 - e^2} \left[\frac{1}{e\sqrt{1 - e^2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{e^2} - 1} - 1 \right] \quad (7)$$

En écoulement radial, il est souvent impossible de caractériser un milieu hétérogène avec une seule valeur de perméabilité équivalente [7,10,13]. Indelman et al. [10] proposent une solution théorique pour le cas d'un écoulement radial dans un milieu tridimensionnel aléatoire présentant une anisotropie axisymétrique. Dans ce cas, la conductivité équivalente en écoulement radial, K_{eq} , est une combinaison linéaire de la conductivité équivalente en régime uniforme K_{efu} et de la moyenne arithmétique des conductivités locales :

$$K_{eq} = K_a(1 - \xi) + K_{efu}\xi \quad (8)$$

Le coefficient de pondération ξ peut être approché par

$$\xi = \frac{\text{Ln}(r/l_h)}{\text{Ln}(r/r_w)} \quad (9)$$

lorsque la distance au puits r est supérieure à plusieurs longueurs de corrélation et lorsque le diamètre du puits r_w est négligeable devant la longueur de corrélation.

Plus récemment, en régime permanent, Riva et al. [18] ont proposé une expression analytique de la transmissivité équivalente, à proximité d'un puits de pompage situé au centre d'un milieu aléatoire hétérogène

cylindrique. Au niveau du puits, cette solution est égale à la moyenne harmonique des perméabilités locales. Pour des distances intermédiaires, elle croît vers la moyenne géométrique, à mesure que la taille du domaine croît devant la longueur de corrélation. Pour les grandes distances, elle continue de croître et décroît à proximité de la condition aux limites de Dirichlet, vers une valeur supérieure à la moyenne géométrique.

Enfin, dans le cas tridimensionnel d'un aquifère captif dont l'écoulement est dû à un pompage permanent, la perméabilité équivalente augmente avec l'anisotropie (milieu stratifié) [7]. Ainsi, la perméabilité équivalente ne dépend pas uniquement des perméabilités locales, mais aussi du régime d'écoulement et des conditions aux limites. Les études concernant l'écoulement radial restent peu nombreuses et se réduisent souvent à l'étude d'un cas spécifique, avec des hypothèses simplificatrices du fait de la complexité du problème.

Quant à la macrodispersivité, Dagan [4] distingue la macrodispersivité effective de la macrodispersivité apparente. En écoulement uniforme, pour les grands temps de séjour, les valeurs de macrodispersivité longitudinale (A_L) et transversale horizontale (A_{Th}) et verticale (A_{Tv}) tendent vers une même limite asymptotique :

$$A_L \rightarrow \sigma_Y^2 l_Y \quad \text{et} \quad A_{Th, Tv} \rightarrow 0 \quad (10)$$

Dans le cas d'un puits d'injection dans un milieu tridimensionnel, la macrodispersivité asymptotique serait trois fois plus petite pour un puits vertical, cinq fois pour une source ponctuelle, que le résultat (10) obtenu en écoulement uniforme [9].

3. Approche expérimentale

3.1. Le dispositif expérimental

MARCEAUS (Modèle d'analyse et de recherche sur la contamination des eaux souterraines – Fig. 1) est un modèle tridimensionnel de dimensions ($600 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$). Il contient un milieu poreux hétérogène, borné par deux limites amont et aval aux charges imposées par des déversoirs générant un gradient de charge. Les autres limites sont à flux nuls.

Deux zones, à l'amont et à l'aval, remplies avec un sable grossier et homogène, assurent la répartition de

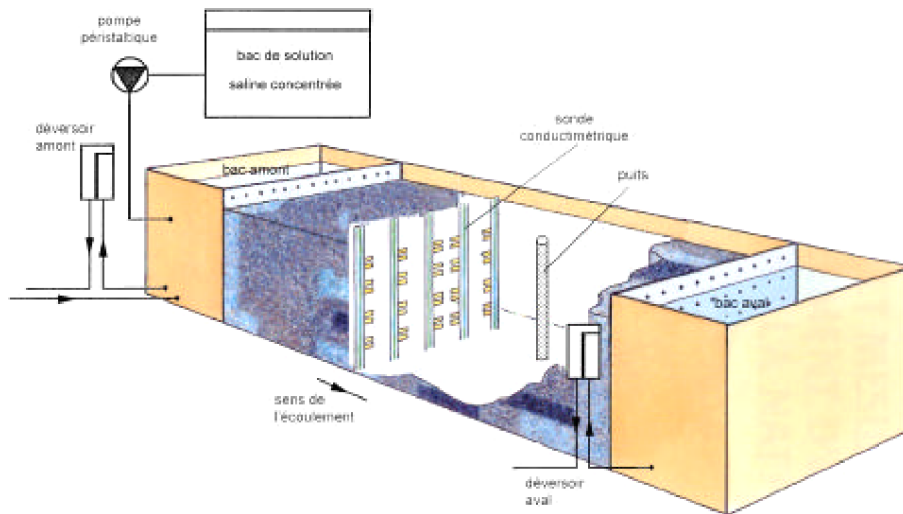


Fig. 1. Vue schématique du MARCEAU'S.

Fig. 1. Schematic presentation of MARCEAU'S.

Tableau 1
Perméabilités des sablesTable 1
Permeabilities of sands

Sable	Milieu aléatoire					
	K60	K40	K30	K20	K10	K150
$K (10^{-3} \text{ m s}^{-1})$	0,20	0,70	1,20	1,40	10,0	77,0

l'écoulement dans tout le milieu hétérogène. Ce dernier ($560 \times 100 \times 90 \text{ cm}^3$) est constitué d'une distribution aléatoire corrélée des perméabilités, i.e. la log-conductivité suit une loi de covariance exponentielle, dans les directions horizontales, définie par :

$$\text{Cov}(h) = \sigma_Y^2 \exp(-h/l_Y) \quad (11)$$

avec $\sigma_Y^2 = 1,03$, la variance de la logconductivité et $l_Y = 23,1 \text{ cm}$, l'échelle intégrale. Il n'y a pas de corrélation selon l'axe vertical, chaque couche de milieu poreux étant générée de manière indépendante (voir [5] pour plus de détails). L'hétérogénéité du milieu est obtenue en répartissant six sables calibrés (Tableau 1) en cubes de 10 cm d'arête selon un agencement déterminé par simulations numériques et respectant les contraintes statistiques concernant la loi et les paramètres de covariance. La moyenne géométrique de la conductivité est égale à $1,59 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. La porosité est la même pour tous les sables et égale à 0,38.

3.2. Les essais de traçage

Trois types d'expérience ont été réalisés (Tableau 2) :

- en écoulement uniforme (réf. TT1W0 – le chiffre 1 indique le numéro de l'expérience, le chiffre 0 le nombre de puits en fonction), un gradient de charge est imposé entre les bacs amont et aval ; le traceur est injecté dans le bac amont ;
- en écoulement radial (réf. TT1W1 à TT4W1), un pompage à débit constant est ajouté à l'écoulement uniforme ; le traceur est injecté dans le bac amont ;
- en injection–pompage (réf. TT1W2 et TT2W2), deux puits sont utilisés pour former un doublet d'injection–pompage à débit constant ; il n'y a pas d'autre écoulement ; le traceur est injecté dans le puits.

Le traceur choisi est le chlorure de sodium (NaCl). Trois cent cinquante cellules de mesures de conductivité électrique sont implémentées dans la cuve et réparties en 14 sections de cinq tiges supportant chacune cinq cellules (Fig. 2). La concentration est aussi mesurée, le cas échéant, à la sortie du puits de pompage.

Le rabattement dans les puits est de 15 cm en injection pompage et, pour l'expérience TT1W1, de 40 cm

Tableau 2

Conditions aux limites des expériences réalisées

Table 2

Boundary conditions of the experiments

Expérience	Distance de traçage	Puits	Débit dans le(s) puits	Débit à l'aval
TT1W0	560 cm	–	0 cm ³ min ⁻¹	1400 cm ³ min ⁻¹
TT1W1	285 cm	W2B	400 cm ³ min ⁻¹	1000 cm ³ min ⁻¹
TT2W1	285 cm	W2B	850 cm ³ min ⁻¹	1800 cm ³ min ⁻¹
TT3W1	405 cm	W3B	770 cm ³ min ⁻¹	1570 cm ³ min ⁻¹
TT4W1	405 cm	W3B	400 cm ³ min ⁻¹	1500 cm ³ min ⁻¹
TT1W2	240 cm	W1B/W3B	500 cm ³ min ⁻¹	0 cm ³ min ⁻¹
TT2W2	120 cm	W1B/W2B	500 cm ³ min ⁻¹	0 cm ³ min ⁻¹

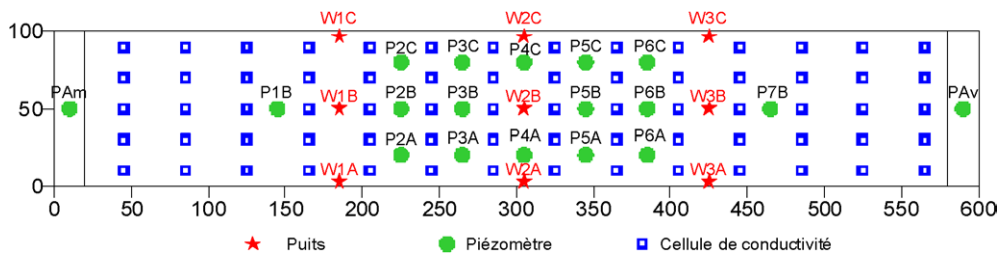


Fig. 2. Localisation des puits, des piézomètres et des cellules de conductivité.

Fig. 2. Wells, piezometer and conductivity cells location.

pour les autres expériences avec pompage. La localisation des puits est précisée dans le [Tableau 2](#) et la [Fig. 2](#).

3.3. Méthode d'interprétation

En écoulement uniforme, la vitesse et la dispersivité sont déterminées en ajustant un modèle numérique 1D sur les phases transitoires du transport [11]. La méthodologie et les résultats sont détaillés dans [5,6].

Chaque expérience comportant un pompage est simulée à l'aide du logiciel MODFLOW–MT3DMS, en considérant un milieu homogène équivalent. Le milieu poreux est représenté par une seule couche homogène et la nappe est supposée libre. Les maillages sont réguliers avec 140×25 mailles carrées de 4 cm de côté pour les expériences TT1W1 à TT4W1 et 280×50 mailles de 2 cm de côté pour les expériences TT1W2 et TT2W2. Chaque maillage est validé en comparant les résultats de simulations avec ceux obtenus avec un maillage deux fois plus fin. La charge à l'amont et à l'aval, ainsi que les débits de pompage et d'in-

jection constituent les conditions aux limites et termes puits/source pour le modèle hydrodynamique.

Pour le transport, la moyenne arithmétique des concentrations mesurées dans la première section de mesure (milieu homogène entre le bac et la section) est utilisée comme condition aux limites amont. On s'affranchit ainsi des incertitudes liées au mélange dans le bac amont.

L'estimation de la perméabilité et de la macrodispersivité est obtenue par calage du modèle numérique sur la concentration à la sortie du puits de pompage : c'est la seule mesure qui intègre un nombre significatif de lignes de courant pour évaluer des paramètres équivalents. Comme pour l'écoulement uniforme, seules les phases transitoires du transport sont utilisées pour ajuster les paramètres.

4. Résultats

En écoulement uniforme, la mesure conjointe des débits et des charges imposées aux extrémités du domaine permet une évaluation expérimentale de la per-

Tableau 3
Résultats théoriques de l'estimation de la perméabilité équivalente

Table 3 Theoretical estimations of the effective hydraulic conductivity					
Notation	$K_{C.P. \min}$	K_G	K_e	K_{eq}^h	$K_{C.P. \max}$
Équation	(2)		(6)	(4), (5)	(3)
Valeur (10^{-3} m s^{-1})	1,10	1,59	2,04	2,46	2,90

méabilité équivalente qui est de l'ordre de $2,41 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Cette valeur est en accord avec l'estimation suggérée par Ababou [1]. L'ensemble des résultats théoriques est regroupé dans le Tableau 3. La valeur expérimentale de la perméabilité est supérieure à la moyenne géométrique des conductivités ($1,59 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$). Ce constat est en accord avec ceux de Neuman et Orr [14], qui montrent que la conductivité effective tend vers la moyenne arithmétique des perméabilités ($3,55 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$) lorsque les dimensions du domaine tendent vers zéro. La valeur calculée est comprise entre les moyennes géométrique et arithmétique, le nombre d'échelles intégrales (23,1 cm) étant insuffisant dans la direction perpendiculaire à l'écoulement moyen (largeur du modèle égale à 100 cm) pour atteindre la moyenne géométrique.

La macrodispersivité expérimentale asymptotique est de l'ordre de 40 à 50 cm, bien supérieure à celle estimée par l'Éq. (10), qui vaut 23,8 cm. Au-delà de huit échelles intégrales, les valeurs expérimentales ne varient pas significativement avec la distance parcourue et le transport peut être considéré comme fickien [6]. La distance nécessaire à l'établissement d'un régime à dispersivité constante est de l'ordre de grandeur de celle prévue théoriquement. La valeur expérimentale plus élevée que celle prévue théoriquement est probablement due à l'extension transversale limitée de la cuve, qui atténue les fluctuations transversales du champ de vitesse et augmente les effets des fluctuations longitudinales.

Tableau 4
Paramètres équivalents ajustés numériquement

Table 4 Numerically fitted equivalent parameters							
Expérience	TT1W0	TT1W1	TT2W1	TT3W1	TT4W1	TT1W2	TT2W2
$K_{eq} (10^{-3} \text{ m s}^{-1})$	2,41	2,60	2,25	2,50	2,33	–	–
A_L (cm)	40–50	60	50	30	40	23	20

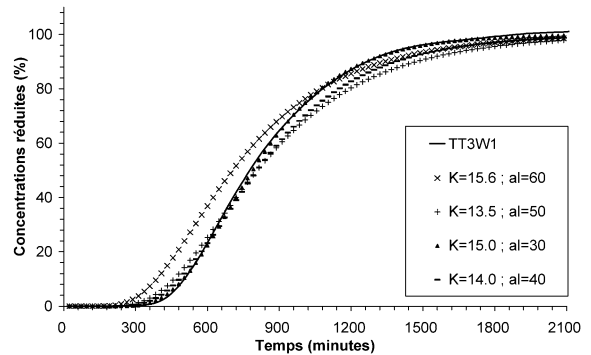


Fig. 3. Simulation avec les paramètres ajustés dans les conditions de l'expérience TT3W1.

Fig. 3. Simulation with the fitted parameters for boundary conditions of the TT3W1 experiment.

En écoulement radial, un jeu de paramètres différent est obtenu pour chaque expérience (Tableau 4). Pour la conductivité hydraulique et la dispersivité, l'ordre de grandeur des paramètres calés (conductivité hydraulique et dispersivité) est le même qu'en écoulement uniforme. La Fig. 3 représente l'évolution de la concentration simulée (symboles) dans le puits pour chaque expérience et la concentration mesurée pour l'expérience TT3W1. Elle permet d'apprécier la très bonne reproduction des observations pour l'expérience TT3W1 par le modèle et les paramètres calés. Cette très bonne reproduction est également obtenue pour les autres expériences. Cette figure montre également que, même si ces paramètres sont du même ordre de grandeur, ils peuvent être considérés comme significativement différents d'une expérience à l'autre.

En configuration de doublet, la perméabilité ne peut être déterminée. Elle a été fixée arbitrairement à $2,5 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Les valeurs de dispersivité obtenues sont 20 et 23 cm pour chacune des deux expériences. Elles sont jusqu'à trois fois plus petites que les autres valeurs expérimentales, conformément aux résultats de Indelman et Dagan [9].

5. Conclusion

Pour les conditions expérimentales étudiées, la modélisation du transport de masse dans un milieu tridimensionnel hétérogène à l'aide d'un milieu bidimensionnel homogène est possible, sous réserve d'utiliser les paramètres équivalents adaptés. Ce résultat n'était pas évident a priori, compte tenu de la faible dimension du domaine par rapport à la longueur de corrélation de la distribution des perméabilités et de la nature de l'écoulement moyen (uniforme, radial, doublet). L'intégration de la troisième dimension de l'écoulement avec des couches non corrélées entre elles au niveau de la distribution des perméabilités assure un effet de prise de moyenne, qui se traduit par un comportement identique à celui d'un milieu 2D, même si la distance parcourue est faible par rapport aux longueurs de corrélation.

L'ordre de grandeur de la conductivité équivalente obtenue est indépendant du type d'écoulement. La dispersivité est supérieure aux valeurs théoriques, probablement à cause des limites imperméables, qui limitent le déplacement transversal du polluant. Cependant, le rapport entre les valeurs obtenues avec un écoulement uniforme et celles obtenues dans la configuration du doublet est conforme aux développements d'Indelman et Dagan [9].

Les différences dans les jeux de paramètres montrent cependant un effet local significatif de la distance source–puits de pompage et du débit de pompage. Dans le cas du doublet, les variations du champ de vitesse sont essentiellement dues à l'hydrodynamique (lignes de courant et temps de parcours du champ moyen des vitesses). Les effets des hétérogénéités locales sont alors moins sensibles, ce qui se traduit par une macrodispersivité plus petite, comparée à celle obtenue en écoulement uniforme.

La généralisation de ces résultats à des milieux de taille limitée par rapport aux longueurs de corrélation est bien sûr prématurée. Les observations menées permettent de nourrir la réflexion sur ce type de configuration, qui, bien que fréquemment rencontré dans les cas de contamination d'aquifères alluviaux, ne bénéficie pas encore de tous les supports théoriques nécessaires.

Références

- [1] R. Ababou, Random porous media flow on large 3-D grids: numerics, performance and application to homogenization, in: M.F. Wheeler (Ed.), *Environmental Studies: Mathematical, Computational and Statistical Analysis*, in: IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Springer-Verlag, 1995, pp. 1–25.
- [2] W.T. Cardwell, R.L. Parsons, Average permeabilities of heterogeneous oil sands, *Trans. Am. Inst. Mining Metal. Eng.* 169 (1945) 34–42.
- [3] J.H. Cushman, L.S. Bennethum, B.X. Hu, A primer on upscaling tools for porous media, *Adv. Water Resour.* 25 (2002) 1043–1067.
- [4] G. Dagan, *Flow and Transport in Porous Formations*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1989, p. 465.
- [5] C. Danquigny, *Étude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène*, thèse, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 2003, 191 p.
- [6] C. Danquigny, P. Ackerer, J.-P. Carlier, Laboratory tracer tests on three-dimensional reconstructed heterogeneous porous media, *J. Hydrol.* 294 (2004) 196–212.
- [7] A. Guadagnini, M. Riva, S.P. Neuman, Three-dimensional steady-state flow to a well in a randomly heterogeneous bounded aquifer, *Water Resour. Res.* 39 (3) (2003) 1048.
- [8] S.K. Huang, N. Toride, M.T.H. Van Genuchten, Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated columns, *Transport Porous Med.* 18 (1995) 283–302.
- [9] P. Indelman, G. Dagan, Solute transport in divergent radial flow through heterogeneous porous media, *J. Fluid Mech.* 384 (1999) 159–182.
- [10] P. Indelman, A. Fiori, G. Dagan, Steady flow towards wells in heterogeneous formations: mean head and equivalent conductivity, *Water Resour. Res.* 32 (7) (1996) 1975–1983.
- [11] D.S. Knopman, C.I. Voss, Further comments on sensitivities, parameters estimation, and sampling design in one-dimensional analysis of solute transport in porous media, *Water Resour. Res.* 24 (1988) 225–238.
- [12] G. Matheron, *Éléments pour une théorie des milieux poreux*, Masson, Paris, 1967.
- [13] P.M. Meier, J. Carrera, X. Sanchez-Vila, An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations, *Water Resour. Res.* 34 (5) (1998) 1011–1025.
- [14] S.P. Neuman, S. Orr, Prediction of steady-state flow in nonuniform geologic media by conditional moments: exact nonlocal formalism, effective conductivities and weak approximation, *Water Resour. Res.* 29 (2) (1993) 341–364.
- [15] P. Neuman, V. Di Federico, Multifaceted nature of hydrogeologic scaling and its interpretation, *Rev. Geophys.* 41 (3) (2003), 4.1–4.31.
- [16] E.K. Paleologos, S.P. Neuman, D. Tartakovsky, Effective hydraulic conductivity of bounded, strongly heterogeneous po-

- rous media, *Water Resour. Res.* 32 (5) (1996) 1333–1341.
- [17] P. Renard, G. de Marsily, Calculating equivalent permeability: a review, *Adv. Water Resour.* 20 (5–6) (1997) 253–278.
- [18] M. Riva, A. Guadagnini, S.P. Neuman, S. Franzetti, Radial flow in a bounded randomly heterogeneous aquifer, *Transport Porous Med.* 45 (2001) 139–193.
- [19] S.E. Silliman, L. Zheng, P. Conwell, The use of laboratory experiments for the study of conservative solute transport in heterogeneous porous media, *Hydrogeol. J.* 6 (1998) 166–177.
- [20] X.H. Wen, J.J. Gomez-Hernandez, Upscaling hydraulic conductivities in heterogeneous media: an overview, *J. Hydrol.* 183 (1–2) (1996) ix–xxxii.