

DEMARCHE DE CARACTERISATION DE LA ZONE NON SATUREE D'UN SITE INDUSTRIEL. (ÉTUDE DU CAS DE L'USINE DE PEINTURE DE SOUK AHRAS)

*Approach to characterization of the unsaturated zone of an industrial site.
(Case study of the plant's paint SOUK AHRAS)*

GHERIS ABDERAHIM¹, MEKSAOUIN MOHAMMED²

¹ Chargé de cours Centre Universitaire de SOUK AHRAS, département de génie civil,
BP 15-53, RN16, SOUK AHRAS, 41000 ALGERIE. E-Mail:a.gheris@hotmail.com

² Maître de conférences Université de BADJI MOKHTAR, département d'hydraulique, BP 12- Sidi Amar, ANNABA 23000. ALGÉRIE

RESUME.

Le travail abordé ici s'inscrit dans une étude globale de mise au point d'outils de caractérisation et de modélisation de flux de polluant transporté par l'eau (approche quantitative) transitant dans la zone non saturée d'un aquifère. Dans notre étude, nous présentons un modèle pratique de calcul de transfert des particules polluantes émises par une source de pollution, représentée dans notre cas par une usine de production de peintures située dans la ville de SOUK AHRAS.

ABSTRACT.

The work discussed here is part of a comprehensive study to develop tools for characterization and modeling flow pollutant transported by water (quantitative approach) passing through the unsaturated zone of an aquifer. In our study, we present a practical model for calculating transfer of pollutants emitted by a source of pollution, in our case represented by a factory to produce paintings located in SOUK AHRAS.

MOTS CLÉS : Site pollué. Modèle. Modélisation. Aquifère contaminé. Environnement.

1 INTRODUCTION

Depuis la construction à la fin des années soixante-dix, d'une usine de production de peinture dans la ville de SOUK AHRAS, aucune étude scientifique n'a été effectuée pour vérifier le risque de pollution des eaux souterraines engendré par les activités industrielles de cette unité. Par l'utilisation des lois physiques de comportement et de modèle mathématique, nous allons essayer de comprendre les mécanismes de transfert de l'eau et de solutés dans un sol variablement saturé [3],[6],[7],[8],[11] de débit bi et tridimensionnelles et en présence d'une nappe d'eau drainée. Dans ce but, une série de prises d'échantillons de sol qui s'étend sur une période de six mois du 11/2007 au 04/2008 a été effectuée pour analyse au laboratoire en vue de la détermination des caractéristiques physiques du sol.

1.1 Equation de continuité

La loi de Darcy indique que l'écoulement d'un liquide (débit) à travers un milieu poreux se fait dans la direction de la force motrice : le gradient de charge hydraulique

agissant sur le liquide. Le débit dépend aussi d'une caractéristique fondamentale du sol : la perméabilité, la tendance actuelle tend à la dénommer *conductivité hydraulique*. A l'échelle macroscopique, la loi de Darcy peut être généralisée aux milieux variablement saturés, en considérant que la conductivité hydraulique est fonction du potentiel de pression :

$$\vec{q} = -\overline{K}(\Psi) \cdot \vec{\nabla} \Phi \quad (1)$$

L'équation de Richards (1931) décrit les transferts d'eau dans un milieu poreux variablement saturé. Elle découle de la combinaison de la loi de Darcy généralisée (Eq.1) avec l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} \quad (2)$$

La loi de darcy généralisée, développée en combinaison avec l'équation de conservation de la masse, sous l'hypothèse d'un fluide incompressible de masse volumique et de viscosité dynamique constante, donne l'équation décrite par Richards (1931) [4]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} \left[-\overline{\mathbf{K}}(\Psi) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(\Phi(x, y, z, t)) \right] \quad (3)$$

L'équation de Richards est une équation non linéaire dont la résolution nécessite en général des moyens numériques [9]. La résolution de l'équation est néanmoins très sensible à la détermination des relations décrivant les paramètres hydrodynamiques, en particulier au voisinage de la saturation [11].

1.2 La convection

La convection représente l'entraînement des éléments en solution (la contamination C) dans le mouvement du fluide qui se déplace.

Le soluté est transporté par le mouvement général de l'eau, à la vitesse \vec{q} définie par la loi de Darcy. Le principe de conservation de la masse permet d'écrire :

$$-\nabla \cdot \left(C \cdot \vec{q} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (C \cdot \theta) \quad (4)$$

1.3 La diffusion moléculaire

Phénomène physico-chimique qui tend à rendre homogène la distribution spatiale du soluté jusqu'à une concentration uniforme par diffusion vers la zone moins concentrée (dans un hypothétique cas où le fluide serait au repos). Son influence ne devient importante que dans les cas d'écoulements lents (<10⁻⁷ cm.h⁻¹). Dans cette optique, on peut écrire l'équation de la diffusivité [2] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C) = \nabla \cdot \left(\theta \cdot \overline{\mathbf{D}} \cdot \nabla (C) \right) \quad (5)$$

1.4. L'équation de convection dispersion classique, CDE

Si on considère que le flux total de soluté est composé de flux dispersif et convectif, le transport peut être décrit par l'équation classique de convection-dispersion :

$$R \frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \overline{D_{ij}} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C) + \frac{q_s}{\varepsilon} C_s \quad (6)$$

La vitesse de Darcy est connue par la résolution préalable de l'équation de Richards. Le facteur de retard (R) n'intervient que pour les solutés réactifs, pour les non réactifs (traceur idéal), R=1 (figure1). Cette variable correspond à la vitesse de l'eau divisée par la vitesse du traceur. Pour les ions chargés négativement comme le chlorure ou le bromure, R<1 [12].

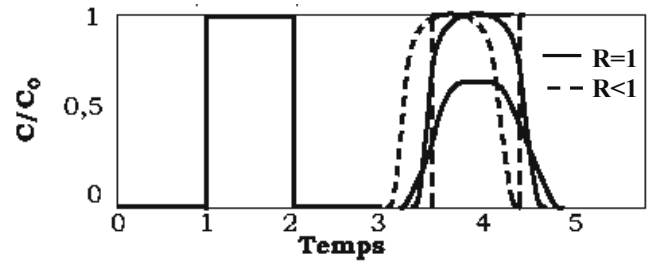


Figure 1 : Effet du facteur de retard.

Soit Ω un espace ouvert borné. On suppose que la frontière $\partial\Omega$ se décompose en trois parties disjointes :

$$\partial\Omega = \Gamma_{inj} \cup \Gamma_N \cup \Gamma_D$$

La frontière Γ_{inj} correspond à la source de la pollution, le long de laquelle le flux est donné par une fonction g. On impose de plus des conditions de type Neumann est homogène sur Γ_N et Dirichlet homogène sur Γ_D (figure2) [1]

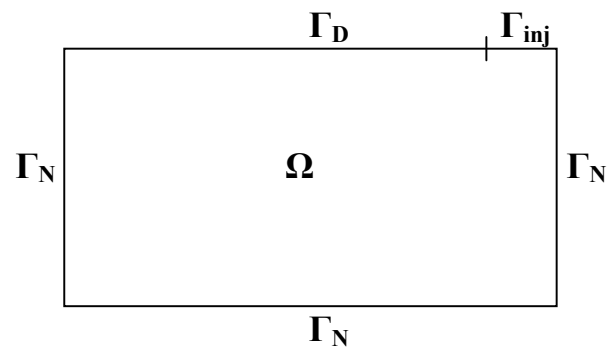


Figure 2 : Domaine de travail.

A l'équilibre, la concentration $c(x, t)$ est régie par l'équation de diffusion,

$$\begin{cases} R \frac{\partial \theta C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \overline{D_{ij}} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C) - \frac{q_s}{\varepsilon} C_s = 0 & \text{dans } \Omega \\ C(t=0, x) = C^0 = 0 & \text{dans } \Omega \\ D \nabla C \cdot n = g & \text{sur } \Gamma_{inj} \\ D \nabla C \cdot n = 0 & \text{sur } \Gamma_N \\ C = 0 & \text{sur } \Gamma_D \end{cases} \quad (7)$$

La formulation variationnelle associée à l'équation aux dérivées partielles (6), consiste à déterminer

$$C(x, t) \in V := \{H^1(\Omega \times \Omega); = 0 \text{ sur } \Gamma_D\}$$

Tel que:

$$\int_{\Omega} (R\theta \frac{dC}{dt} - \overline{D}_{ij} \nabla C \cdot \nabla \theta + \nabla q C - \frac{q_s}{\varepsilon} C_s) dx = \int_{\Gamma_{inj}} g \theta ds \quad \text{pour tout } \theta \in V \quad (8)$$

Pour la résolution numérique de la formule variationnelle (8), nous discrétisons la dérivée temporelle.

$$\frac{dC}{dt} \approx \frac{C^n - C^{n-1}}{\Delta t}$$

Ainsi, C^n approximation de la concentration au temps $n\Delta t$ est une solution du problème variationnel.

$$\int_{\Omega} (\frac{C^n(x) - C^{n-1}}{\Delta t} R\theta - \overline{D}_{ij} \nabla C^n \cdot \nabla \theta + \nabla q C^n - \frac{q_s}{\varepsilon} C_s) dx = \int_{\Gamma_{inj}} g \theta ds \quad (9)$$

Pour tout $\theta \in V$ cette dernière formulation est résolue à l'aide d'une approximation par élément fini de Lagrange P1.

2 RESULTAS (REPONSE QUALITATIVE DU MODELE)

Le but de cette partie est de tester l'efficacité de notre modèle pour la détermination de l'état de concentration C . L'implantation des équations (8) et (9) a été effectuée sous FreeFem++, Version 2.11 [5].

Sur environ 2Ha que couvre l'installation d'une usine de production des peintures (source de la contamination) située à l'extrémité nord de la ville de SOUK AHRAS dans le nord est de l'Algérie, une coupe verticale représentant le profil du site a été modélisée avec le code FreeFem++ ; avec ce programme nous avons simulé une éventuelle infiltration de produits chimiques émise par une surface unitaire représentatif, avec comme paramètres :

Tableau 1 : Données de l'exemple

Paramètres de la simulation	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05
Eloignement total [M]	100	100	100	25	05
Pas de longueur [M]	01	01	01	01	01
Temps total [J]	20 à 200000	20 à 200000	20 à 200000	200000	20000
Profondeur [M]	0	02	05	0-5-10	0-2-10
Vitesse du flux [MJ^{-1}]	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Épaisseur de l'aquifère [M]	07	07	07	07	07
Masse d'injection ponctuelle [G]	1000	1000	1000	1000	1000
Degré d'injection de la source [GJ^{-1}]	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74
Le facteur de retard [-]	01	01	01	01	01
La porosité effective [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
La dispersivité longitudinal [M]	02	02	02	02	02
La dispersivité transversal [M]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Le facteur de dégradation [J^{-1}]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Longueur de la source [M]	01	01	01	01	01
Largeur de la source [M]	01	01	01	01	01
Méthode d'analyse [-]	02	02	02	02	01

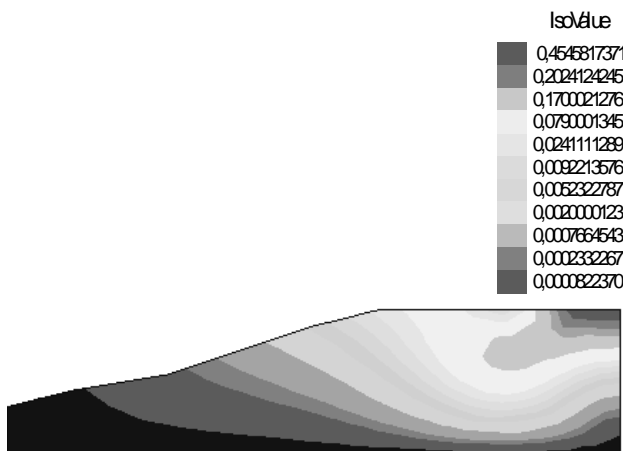


Figure 3 : État de la concentration à 200 jours (Iso valeurs).

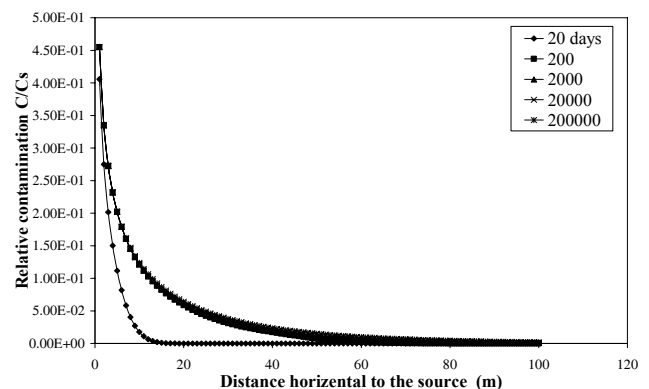


Figure 4 : État de la concentration à la surface (Contamination par injection continue). Essai 1.

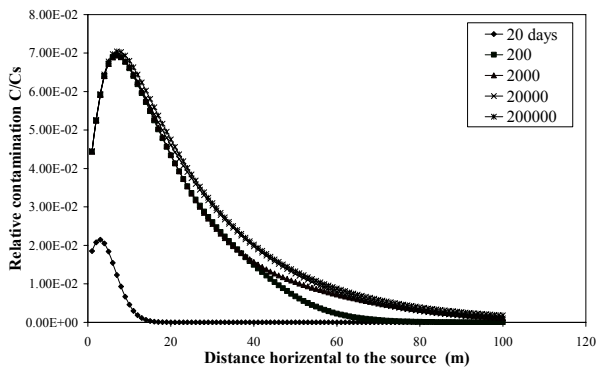


Figure 5 : État de la concentration à une profondeur de 02m (contamination par injection continue). Essai2

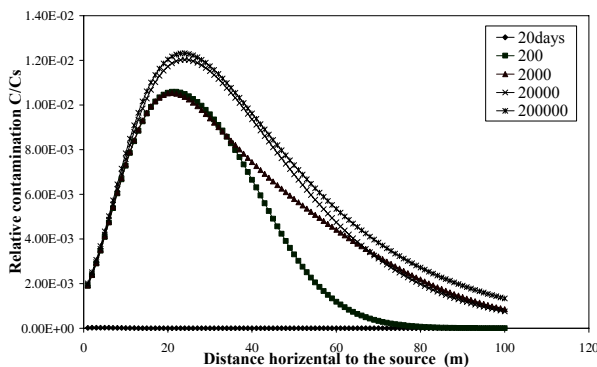


Figure 6 : État de la concentration à une profondeur de 05m (Contamination par injection continue). Essai3

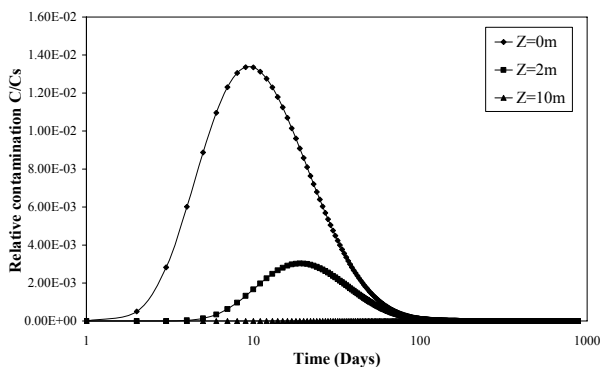


Figure 7 : État de la concentration à une position constante $x=05m$ (Contamination par injection ponctuelle). Essai4

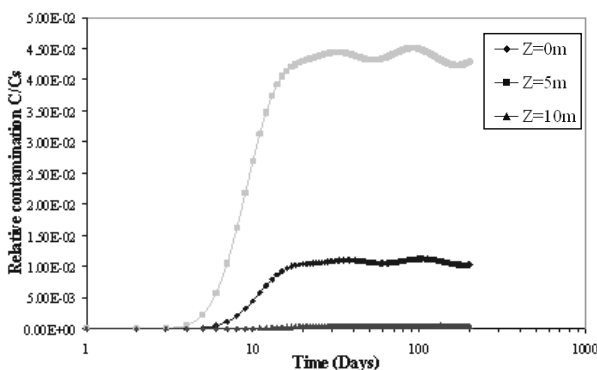


Figure 8 : État de la concentration à une position constante $x=25m$ (Contamination par injection continue). Essai5

3 DISCUSSIONS

3.1 Evolutions en fonction de l'espace

La forme particulière des courbes (forme de cloche), représentée dans les figures (5) et (6), traduit le passage progressif de la contamination transportée par le flux du liquide. La figure (3) montre que le bulbe rouge est fortement saturé en concentration au droit de la zone non saturée lors de la phase d'infiltration mais s'homogénéise lors de la phase de drainage au niveau de l'aquifère.

On remarque aussi que la grande masse polluante se déplace vers les profondeurs selon une trajectoire inclinée.

3.2 Evolutions en fonction du temps

Si on prend un point fixe de coordonnées (x, z) , on observe une rapide augmentation de la concentration entre le vingtième jour et le deux centième jour. L'augmentation devient lente au delà du deux millièmes jour ; ce phénomène est dû à un effet de saturation du milieu par le contaminant en question. La figure.7 montre l'existence de la contamination à des profondeurs différentes et selon des degrés divers. L'augmentation rapide de la concentration puis sa stabilisation à un certain degré tout au long de la progression de la solution, engendre un risque permanent de pénétration constante de la pollution dans aquifères, figure.8.

4 CONCLUSION

La solution numérique que nous avons utilisée pour la résolution des équations, nous permet de mettre en évidence l'existence d'une part significative dans le processus d'infiltration du flux qui s'écoule horizontalement dans la zone non saturée (ZNS), contrairement à la théorie classique du drainage qui suppose que les écoulements dans la zone non saturée sont supposés être verticaux. Ce résultat est en accord avec les travaux de Silliman *et al.* (2002). La zone non saturée (ZNS) joue donc un rôle très important dans le processus d'infiltration, car c'est dans cette interface que les échanges d'eau, polluants et microorganismes vers la nappe ou vers l'atmosphère se produisent. Cette étude a aussi mis en évidence l'existence de phénomène de transport caractérisé par la rapidité d'apparition des solutés dans les aquifères quelques jours après l'application du soluté en surface en très forte concentration. On peut dire que ce phénomène s'explique par le concept de la circulation préférentielle correspondant à des flux rapides. Passant par ces circuits, le soluté progresse plus loin dans les aquifères à conductivité hydraulique élevée. Par conséquent la contamination de la nappe phréatique de la ville de SOUK AHRAS et une réalité vue le temps écoulée depuis l'ouverture de l'usine.

De cette étude, quelques questions émergent : Quelle est l'évolution de l'espace poral du sol sous l'effet des contraintes hydriques et chimiques? Quel est le temps de résidence exact du soluté dans le sol? Quelle quantité d'eau

est nécessaire afin de lessiver les solutés présents dans le sol ?

LISTE DES NOTATIONS

q : vitesse de darcy [M, J^{-1}]

$K(\Psi)$: représente la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel [M, J^{-1}]

$\nabla\Phi$: Gradient de potentiel [M]

θ : Teneur en eau volumique [M^3M^{-3}]

C : concentration [$G.M^{-3}$]

$\underline{\underline{D}}$: Tenseur de dispersion [$M^2.J^{-1}$]

$\underline{\underline{D}}_{ij}$: Tenseur du coefficient de dispersion [$M^2.J^{-1}$]

q_i : La composante du flux d'eau [$M.J^{-1}$]

R : facteur de retard [-]

qs : flux volumétrique d'eau par unité de volume d'aquifère, positive source continue, négative sources instantané [J^{-1}]

ε : la porosité [-]

C_s : concentration initiale [$G.M^{-3}$]

REFERENCES.

- [1] Allaire, G., Silva, D., Pantz, O., 2004."Determination of diffusion coefficients on a reverses problem".École polytechnique. Centre de mathématiques appliquées, France, RI n°560:4-6.
- [2] Anguela, T.P., 2004."Study of the transfer of water and solutions in a soil, drained artificially superficial tablecloth ". Doctorate thesis, ENGREF, Paris, France, 210pp.
- [3] Clement, T.P., Wise, W.R., Molz, F.J., Wen, M., 1996. "A comparison of modeling approaches for steady-state unconfined flow". Journal of Hydrology, 181(1-4): 189-209.
- [4] Chossat, J.C., "La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols". Lavoisier, Paris, 720pp
- [5] F. Hecht, O. Pironneau, A. Le Hyaric, K. Ohtsuka, 2002. "FreeFem++ Version 2.11". <http://www.freefem.org/ff++>
- [6] Kao, C., Bouarfa, S. Zimmer, D., 2001. "Steady state analysis of unsaturated flow above a shallow water-table aquifer drained by ditches". Journal of Hydrology, 250: 122-133.
- [7] Romano, C.G., Frind, E.O. et Rudolph, D.L., 1999. "Significance of unsaturated flow and seepage faces in the simulation of steady-state subsurface flow". Ground Water, 37(4): 625-632.
- [8] Silliman, S.E., Berkowitz, B., Simunek, J. et van Genuchten, M.T., 2002. "Fluid flow and solute migration within the capillary fringe". Ground Water, 40(1): 76-84.
- [9] Simunek, J. and J.W. Hopmans, 2002a. "Parameter optimization and nonlinear Fitting". In: J.H. Dane and G. Clark Topp (Eds), Methods of soil analysis Part4: Physical methods.
- [10] Vauclin, M., Kanji, D. et Vachaud, G., 1979. "Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated-saturated water-table recharge problem". Water Resources Research, 15: 1089-1101.
- [11] Vogel, T., M.T. Genuchten and M.Cislerova, 2001. "Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions". Adv. Water Resou., 24:133-144.
- [12] Wierenga, P.J., 1995. "Water and solute transport and storage". In:L.G. Wilson, L.G. Everett and S.J. Cullen (Eds), Handbook of Vadose Zone Characterisation and Monitoring. Lewis Publishers, London, pp: 41-59.