

# **IMPACT DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES SUR LA POLLUTION DE LA NAPPE D'EAU DE LA VILLE DE SOUK AHRAS, ALGÉRIE. -CAS D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION DE PEINTURES-**

**GHERIS A/Rahim<sup>A</sup>, MEKSAOUINE Mohammed<sup>B</sup>, MESSAOUDENE A<sup>C</sup>**

<sup>A</sup> Centre universitaire de SOUK AHRAS, département de génie civil, SOUK AHRAS, ALGERIE  
BP 1553 Route ANNABA- SOUK AHRAS 41000 ALGÉRIE.

Email : a.gheris@caramail.com

<sup>B</sup> Université de BADJI MOKHTAR, département d'hydraulique, BP 12- Sidi Amar, ANNABA 23000. ALGÉRIE

Email : m.meksauin.com@caramail.com

<sup>C</sup> Université de BADJI MOKHTAR, faculté de médecine de ANNABA, laboratoire de toxicologie, BP 12- Sidi Amar, ANNABA 23000. ALGÉRIE. Email : beya.mess@caramail.com

## **Résumé.**

La pollution des aquifères est un fléau qui tend à s'accroître dans la plupart des zones industrielles du pays. Il est clair que ce sujet particulièrement sensible suscite l'inquiétude fondée de l'opinion publique. Le stockage des produits chimiques (en particulier le stockage de déchets en surface, et dans une moindre mesure, les sols pollués accidentellement) nécessite une bonne connaissance des couches géologiques afin d'évaluer l'impact d'une éventuelle propagation d'éléments de pollution chimique dans les eaux souterraines. A cet effet, l'une des méthodes envisagée consiste à injecter dans le sol différents éléments et à mesurer l'évolution de leurs concentrations. On détermine ensuite une configuration géologique correspondant aux observations. Une autre méthode est celle qui utilise la simulation numérique bi et tridimensionnelle en vue de modéliser et prédire l'évolution de la concentration à travers les couches du sol. Nous nous sommes donc attachés, dans ce travail, à déterminer sur un exemple (cas d'une usine de production de peintures de la ville de SOUK AHRAS, ALGERIE), l'évolution de la pollution des eaux souterraines, en utilisant une méthode basée sur la résolution numérique du problème inverse de la relation classique de diffusion, dans les milieux poreux.

## **Abstract.**

The pollution of the aquiferous is a curse that has the tendency to increase in most the industrial zones of the country. It is clear that this particularly appreciable topic causes the concern founded of the public opinion. The storage of chemicals (in particular the storage of garbages in surface, and in a least measure, the polluted accidentally soils) requires good geological layer knowledge in order to value the impact of a possible propagation of elements of chemical pollution in the groundwater. To this effect, one of methods considered consists in injecting in soil different elements and to measure the evolution of their concentration. One determines a geological profile corresponding to observations then. Another method and the one that uses the simulation numeric bi and tree dimensional in view of modelling and to predict the evolution of the concentration through layers of soil. We attached ourselves therefore, in this work, to determine on an example (case of a factory of production of paintings of the city of SOUK AHRAS, ALGERIA); the evolution of the polluting of the underground waters, as using a method based on the numeric resolution of the problem reverses the classic relation of diffusion, in the porous surroundings.

## **Mots clés.**

Site contaminé. Eau souterraine polluée. Modèle. Modélisation. Environnement

## 1. Introduction et problématique

Dans la théorie classique du drainage, les écoulements sont supposés être verticaux dans la zone non saturée (ZNS) et horizontaux dans la nappe. C'est le concept de la couche de mélange. Or de nombreux auteurs (Vauclin et al, 1979 ; Clement et al, 1996 ; Romano et al, 1999 ; Kao et al, 2001 ; Silliman et al, 2002) soulignent l'existence d'une part significative de l'infiltration qui s'écoule horizontalement dans cette zone. Donc la zone non saturée (ZNS), joue 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. Nous étudierons premièrement l'évolution de l'état de la concentration de la pollution des eaux souterraines au voisinage du domaine étudié par la résolution de l'équation qui régie le transport des particules (équation de la diffusion), en choisissant une forme précise des coefficients de diffusion et nous calculerons la concentration résultante. Dans une deuxième étape, on cherche à retrouver ces coefficients de diffusion par un problème inverse, à partir de la seule donnée des concentrations disponibles (pollution actuelle) prélevées sur différents points d'eaux, pour cela, nous avons procédé à une série de prélèvements d'eaux au niveau des différents puits de la zone étudiée, ces derniers ont été soumis à des essais de potabilité et de pollution au niveau du laboratoire de toxicologie du CHU ANNABA. Par la suite, nous avons cherché à minimiser la différence quadratique entre les champs de concentration actuelle et cible, calculée lors de la première étape. Le fait que les données du problème inverse ne sont pas issues de mesures effectuées sur le terrain mais d'une simulation numérique a un double avantage: on peut utiliser un modèle physique simplifié, et on peut comparer le champ de diffusion solution du problème inverse au champ de diffusion initial (qui est en pratique inconnu). Notre travail s'articule ainsi sur l'estimation du risque de contamination des eaux souterraines engendrée par les activités industrielles de l'unité de production des peintures de la ville de SOUK AHRAS sur la santé de la population locale.

## 2. Définition

Dans notre travail, nous considérons que l'évolution de la concentration de la pollution suit la relation classique de diffusion dans un milieu poreux :

$$\frac{\partial c}{\partial t}(x, t) - \text{div}(D(x)\nabla c(x, t)) + R\eta(x)c(x, t) = 0 \quad (1)$$

Où  $c(x, t)$  est la concentration qui dépend de la position de la source et du temps,  $\eta(x)$  la porosité,  $D(x)$  la diffusion et  $R$  le coefficient de retards. Pour la condition initiale, la concentration est nulle à l'instant initiale  $t = 0$ . Pour les conditions aux limites, on suppose que le flux est partout nul, sauf au niveau de la source d'injection dans laquelle la concentration diminue au cours du temps, c'est à dire:

$$D\nabla c(x, t) \cdot n = g \quad \text{sur } \Gamma_{inj} \quad (2)$$

Nous cherchons à déterminer les champs de  $D$  et  $\eta$  de diffusion et de porosité étant donnée la concentration  $c$  en pollution, mesurée sur une partie du domaine.

### 2.1. Le problème direct

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

$$\partial\Omega = \Gamma_{inj} \cup \Gamma_N \cup \Gamma_D \quad (3)$$

La frontière  $\Gamma_{inj}$  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  $\Gamma_N$  et Dirichlet homogène sur  $\Gamma_D$  figure1, Anguela (2004).

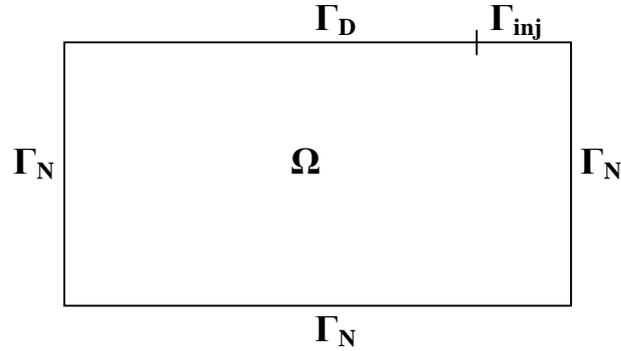


Figure1. Domaine de travail.

A l'équilibre, la concentration  $c(x)$  est régie par l'équation de diffusion,

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t}(x,t) - \text{div}(D\nabla c) + R\eta c = 0 & \text{dans } \Omega \\ c(t=0, x) = c^0 = 0 & \text{dans } \Omega \\ D\nabla c \cdot n = g & \text{sur } \Gamma_{inj} \\ D\nabla c \cdot n = 0 & \text{sur } \Gamma_N \\ c = 0 & \text{sur } \Gamma_D \end{cases} \quad (4)$$

Où  $D(x)$  et  $\eta(x)$  sont respectivement les coefficients de diffusion et de porosité, tandis que  $R$  est le coefficient de retard. La formulation variationnelle associée à l'équation aux dérivées partielles (1), consiste à déterminer

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

Tel que

$$\int_{\Omega} \left( \frac{dc}{dt} + D\nabla c \cdot \nabla \phi + R\eta c \phi \right) dx = \int_{\Gamma_{inj}} g \phi ds \quad \text{pour tout } \phi \in V \quad (5)$$

Pour la résolution numérique de la formulation variationnelle (5), 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.

$$\int_{\Omega} \frac{c^n(x) - c^{n-1}}{\Delta t} \phi + D\nabla c^n \cdot \nabla \phi + R\eta c^n \phi dx = \int_{\Gamma_{inj}} g \phi ds \quad (6)$$

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

## 2.2. Problème Inverse

La résolution pratique du problème inverse consiste à minimiser une fonctionnel coût, erreur quadratique entre les données calculées et les données “observées”, Allaire (2004). A cet effet, une méthode de type gradient est utilisée.

Dans notre travail, nous considérons deux types de fonctionnelles, l’une évaluant l’erreur quadratique sur une partie  $\Gamma_0$  du bord, l’autre sur tout le domaine  $\Omega$ ,

$$J_1(D, \eta) = \|c(D, \eta) - c_d\|_{L^2(\Omega)}^2, \quad (7)$$

Soit,

$$J_2(D, \eta) = \|c(D, \eta) - c_d\|_{L^2(\Gamma_0)}^2, \quad (8)$$

Où  $c_d = c(D_d, \eta_d)$  est la concentration de référence.  $C$  est la solution du problème direct pour des coefficients de diffusion et de porosité  $D_d$  et  $\eta_d$  donnés.

## 2.3. Optimisation paramétrique

Afin d’implanter une méthode de type gradient en vue de minimiser  $J_1$  ou  $J_2$ , il est nécessaire de déterminer leurs dérivées par rapport aux paramètres  $D$  et  $\eta$

### 2.3.1. Calcul des gradients par état adjoint

On cherche à déterminer  $D$  et  $\eta$  correspondant à une concentration donnée  $c_d$ . On introduit la fonctionnelle

$$J_1^{tf}(D, \eta) = \int_{\Gamma_0} (c(x, t_f) - c_d(x, t_f))^2 ds + \int_0^{tf} \int_{\Gamma_0} (c(x, t) - c_d(x, t))^2 ds dt \quad (9)$$

Où  $c$  est la solution de (4). Afin de déterminer les dérivées de  $J_1^{tf}$  par rapport à  $D$  et  $\eta$ , nous introduisons le Lagrangien

$$L(D, \eta, c, p) = \int_{\Gamma_0} (c(x, t_f) - c_d(x, t_f))^2 ds + \int_0^{tf} \int_{\Gamma_0} (c(x, t) - c_d(x, t))^2 ds dt - \int_0^{tf} \int_{\Omega} p \frac{\partial c}{\partial t} + D \nabla p \cdot \nabla c + R \eta c p ds dt + \int_0^{tf} \int_{\Gamma_{inj}} p g ds dt \quad (10)$$

On en déduit l’équation d’état adjoint par le calcul de la dérivée  $\left\langle \frac{\partial L}{\partial c}, q \right\rangle$  où  $q \in C^0$  et

$q(t=0) = 0$  :

$$\left\langle \frac{\partial L}{\partial c}, q \right\rangle = \int_{\Gamma_0} 2(c(x, t_f) - c_d(x, t_f))q(x, t_f) ds + \int_0^{tf} \int_{\Gamma_0} 2(c(x, t) - c_d(x, t))q(x, t) ds dt - \int_0^{tf} \int_{\Omega} p \frac{\partial q}{\partial t} + D \nabla p \cdot \nabla q + R \eta q p ds dt$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial p}{\partial t} - \text{div} D(x) \nabla p(x,t) + R\eta(x)p(x,t) = 0 \quad \text{dans } ]0, \text{tf}[ \times \Omega \\ p(\text{tf}, x) = 2(c - c_d)(\text{tf}, x) \quad \text{dans } \Omega \\ D \nabla p \cdot n = 2(c - c_d) \quad \text{sur } \Gamma_{\text{inj}} \\ D \nabla p \cdot n = 0 \quad \text{sur } \Gamma_N \\ p = 0 \quad \text{sur } \Gamma_D \end{array} \right. \quad (11)$$

On note  $p(D, \eta)$  la solution de ce problème. La dérivée de  $J_1^{\text{tf}}$  par rapport à  $D$  pour tout fonction test  $E$ , on a :

$$\left\langle \frac{\partial J_1^{\text{tf}}}{\partial D}, E \right\rangle = - \int_0^{\text{tf}} \int_{\Omega} \nabla c \cdot \nabla p E \, ds \, dt \quad (12)$$

Les dérivés par rapport à  $\eta$  s'obtiennent de manière similaire. Notons à nouveau que le calcul des dérivées de  $J_2^{\text{tf}}$  ou de  $J_1^{\text{tf}}$  nécessite le stockage de la concentration  $c$  et de l'état adjoint  $p$  à tous les instants  $n\Delta t$ , ce qui s'avère coûteux dès que le pas de discrétisation  $\Delta t$  est petit.

### 3. Mesures toxicologiques et analyse analytique

Notre site d'étude se trouve à l'extrême nord de la ville de SOUK AHRAS dans le nord-est de L'ALGÉRIE. Sur environ 15Ha de surface que couvre l'installation de l'unité de production des peintures (source de la contamination) figure2. Nous avons effectué douze campagnes de prélèvements d'échantillons d'eaux à partir de trois puits (SP01, SP02, SP03). Elle s'est étalée sur une période de deux mois du 12/2006 au 12/2007.

Des analyses physico-chimiques de potabilité et de pollution ont été effectuées au laboratoire de toxicologie du CHU de Annaba. Les paramètres analysés sont les suivants : Nitrites, Ammonium, Sulfates, Chlorures. La figure3 représente la variation de ces paramètres en fonction du temps.



Figure2. Vue aérienne de l'usine de production des peintures ville de SOUK AHRAS SP01, SP02, SP03 puits de prélèvement, A-A coupe verticale.

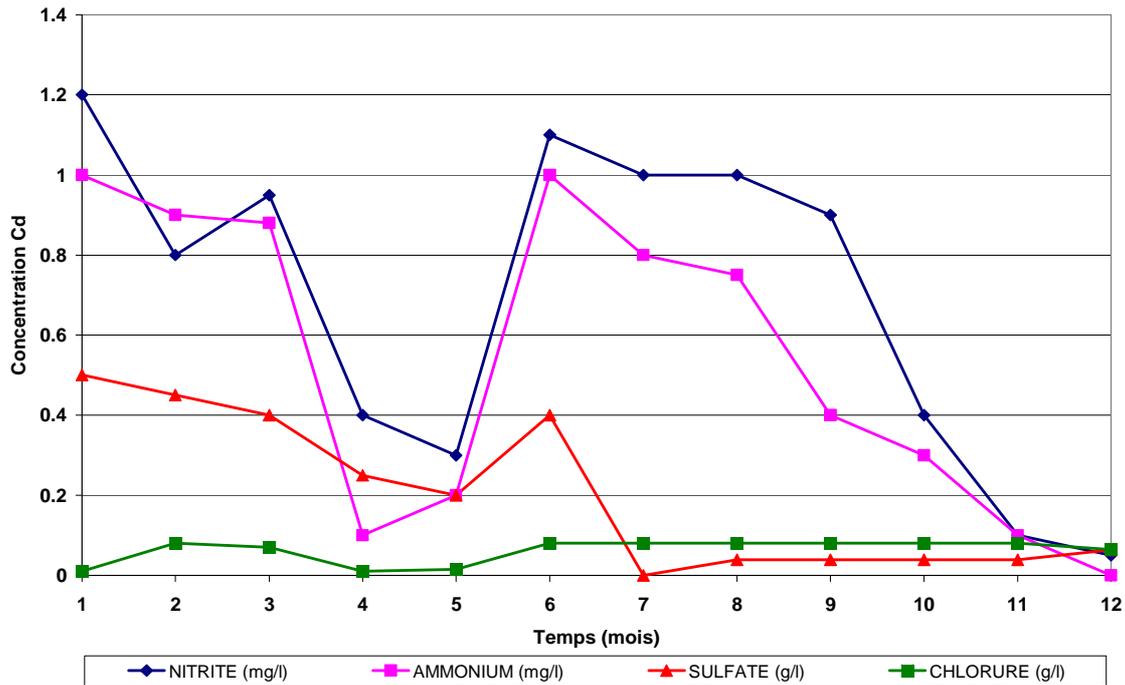


Figure3. Variation des paramètres de pollution, valeurs moyennes des trois zones de prélèvement.

Nous remarquons, que les nitrites et l'ammonium sont supérieurs à la normes de l'OMS (0,5mg/l pour les nitrites et 0,1mg/l pour l'ammonium, 200mg/l pour les sulfates) et ceci durant presque toute la durée de l'étude, ainsi que les sulfates sont élevés pendant les six premiers mois. Ces valeurs élevées rendent compte de la présence d'une pollution aux alentours de l'usine de peinture. Rappelons que les nitrites et l'ammonium sont des indicateurs de la pollution.

Si on compare l'évolution des concentrations en fonction de la pluviométrie, on remarque qu'il n'y a pas de relation directe entre les deux. En effet, on pourrait s'attendre un à phénomène de lessivage, due à la grande quantité de pluie enregistrés pendant les trois premiers mois figure4, mais ce n'est pas le cas. Au contraire, pendant cette période on enregistre des valeurs maximales de nos concentrations.

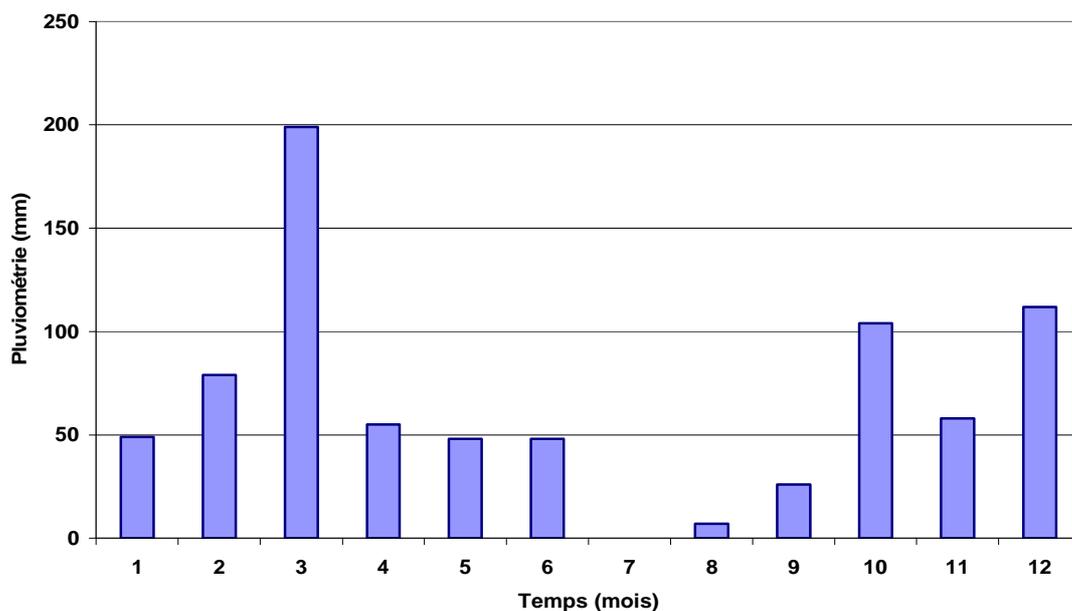


Figure4. Valeurs mensuelles de la pluviométrie de la région de SOUK AHRAS.

Si on relie cette évolution à l'activité de l'usine de peinture, on remarque que les valeurs enregistrent des niveaux très bas pendant l'été ce qui correspond en fait à la période des congés annuels (juillet et août) d'une part et d'autre part à la période du jeûne du ramadan (mois de septembre).

#### 4. Exemple d'application et résultats numérique

Le but de cette partie est de tester l'efficacité de la méthode du problème inverse pour la détermination des coefficients  $\eta$  et  $D$ . L'implantation des équations a été effectuée sous FreeFem++, Version 2.11 (F. Hecht, O. Pironneau, A. Le Hyaric, K. Ohtsuka, 2002).

##### 4.1. Algorithme numérique

1. nous choisissons des conditions initiales  $\eta_0, D_0$
2. Pour  $n \geq 0$  :
- 3.

$$\begin{pmatrix} D_{n+1} \\ \eta_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max(D_{\min}, \min(D_{\max}, D_n - \mu_n \frac{\partial J}{\partial D})) \\ \max(\eta_{\min}, \min(\eta_{\max}, \eta_n - \mu_n \frac{\partial J}{\partial \eta})) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Nous supposons que le pas de descente  $\mu$  fixe :

- Si  $J_{n+1} > J_n$ , alors on recalcule  $D_{n+1}$ ,  $\eta_{n+1}$  et  $c_n$  en utilisant un pas plus petit,  $\frac{\mu}{2}$
- Si  $J_{n+1} \leq J_n$ , alors on garde les valeurs rencontrés et de plus on augmente le pas, par exemple on peut prendre  $1.1 \times \mu$ .

Nous avons supposé que les coefficients  $\eta$  et  $D$  sont des fonctions régulières définies par :

$$\eta_d = x^2 + y^2 + \varepsilon \text{ et } D_d = 2x^2 + 3y^2 + \varepsilon$$

Avec  $\varepsilon = 0.0001$ , les conditions initiales pour  $\eta^0$  et  $D^0$  choisies sont  $\eta_0 = D_0 = 0.5$ . De plus nous avons fixé  $\eta_{\min} = 0.001, D_{\min} = 0.01, \eta_{\max} = 2.1$  et  $D_{\max} = 2.0$

Pour les besoins du calcul nous prenons les valeurs moyennes des différents paramètres mesurés. Une coupe verticale représentant le profil du site a été modélisée avec le code FreeFem++ Version 2.11, en tenant compte de la position de l'usine de production des peintures et le point de prélèvement ciblé. Les figures 5 et 6 comparent les valeurs des concentrations  $c$  données en fonction  $D^d$  et  $\eta^d$  avec les concentrations calculées après optimisation. Nous avons utilisé pour la simulation la valeur moyenne mesurée du nitrite comme paramètre test  $c_d$ .

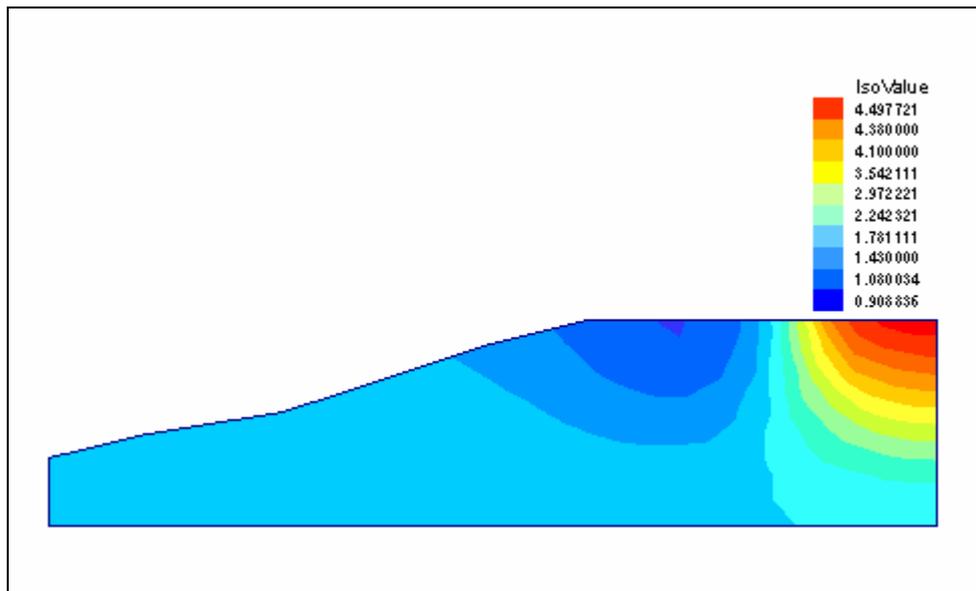


Figure5. Valeurs de la concentration donnée.

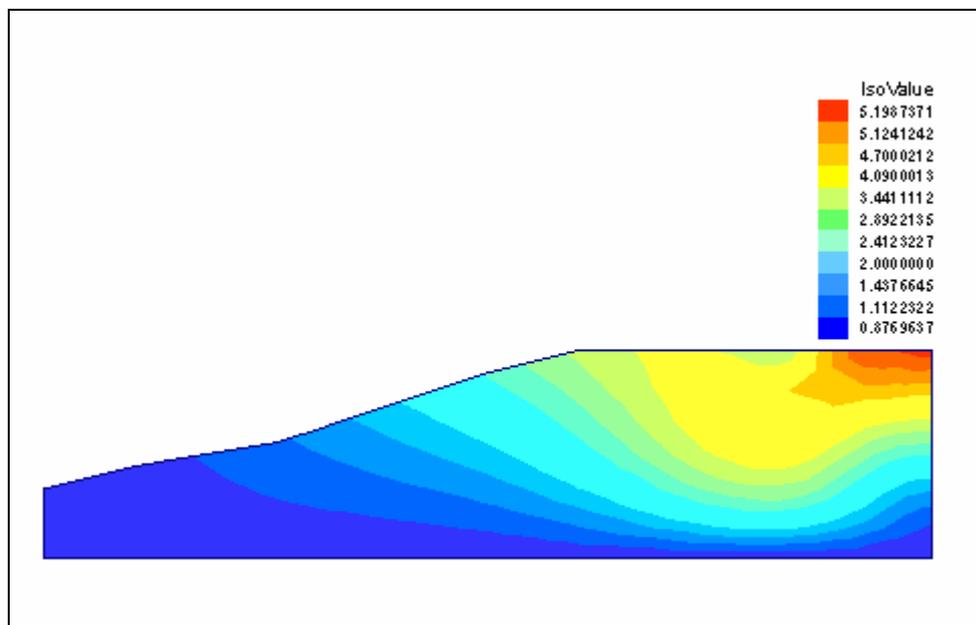


Figure6. Valeurs de la concentration calculée après optimisation.

## 5. Conclusion

La méthode d'optimisation utilisée dans ce travail a permis d'obtenir une bonne décroissance de la fonction de moindre carré correspondante à des approximations du champ de concentration du polluant. La résolution du problème inverse nous a permis d'étudier la répartition de la concentration au niveau du sous sol à partir de simple mesures de toxicité effectuées en aval, ainsi cette technique nous a permis d'éviter l'utilisation de méthodes de détection distrayants très coûteuses (sondages). Remarquons aussi que la région où se sont effectuée les prélèvements n'a pas d'activité agricole. Donc, les valeurs élevées de certains paramètres ne peuvent être que d'origine industrielle. Plusieurs améliorations peuvent être apportées, principalement à l'équation de diffusion, en ajoutant le terme de la convection. Enfin, il faut compléter les analyses au laboratoire en dosant d'autres éléments de pollution comme les métaux lourds (plomb, cadmium).

## 6. Références

- 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.
- 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.
- 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.
- Extrait de la vue aérienne de la ville de SOUK AHRAS, centre nationale de cartographie et de télédétection, Alger, Algérie.
- F. Hecht, O. Pironneau, A. Le Hyaric, K. Ohtsuka, 2002. "FreeFem++ Version 2.11". <http://www.freefem.org/ff++>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.