
Etude du transfert des substances polluantes en solution dans un milieu poreux sur banc d'essai au laboratoire

Abderrazak Bouanani* — **Kamila Baba-Hamed*,**** — **Lamia Yebedri ****

**Laboratoire 25, Département d'hydraulique, Université Abou Bekr Belkaïd, BP 119 13.000, Tlemcen, a_bouanani@ yahoo.fr*

***Département des Sciences de la Terre, Université Abou Bekr Belkaïd, BP 119 13.000, Tlemcen, kambabahamed@ yahoo.fr*

RESUME: Un aquifère à nappe libre, a été simulé dans un banc d'essai hydrologique au laboratoire, visant à étudier le comportement de quelques traceurs (Chlorure de sodium, Rhodamine –B, Colorant textile) dans un milieu poreux (sable). L'interprétation des résultats des essais de traçage réalisés, a permis de mettre en évidence que le transfert des traceurs utilisés, en écoulement gravitaire et convergent, se fait principalement par convection. Le chlorure de sodium présente des caractères conservatifs (pas d'adsorption), tandis que, la rhodamine –B et le colorant textile présentent des propriétés sorptives. Les différents essais de simulation de transport des polluants en milieu homogène par le modèle ASM.5, montrent que la propagation des contaminants s'effectue par convection, avec un panache de pollution de 40 cm de rayon mis en évidence par les essais de traçage réalisés sur le modèle physique.

ABSTRACT: An unconfined aquifer is simulated in a hydrologic test bench in the laboratory, in the perspective to study the behaviour of a few tracers (Sodium chloride, Rhodamine-B, Dye textiles) in a porous media (sand). The interpretation of the results of the tests of tracing has proved that the transfer of the tracers used is done mainly by convection. The sodium chloride presents conservative characters (no adsorption), otherwise, Rhodamine -B and textile dye present sorptive properties. The various tests of simulation of transport of the pollutants in homogeneous media by model ASM.5, show that the propagation of the contaminants is carried out by convection, with a plume of pollution of 40 cm ray, confirmed by tracing tests carried out on the physical model.

MOTS-CLÉS: Banc d'essai– Traceurs – Modélisation.

KEYWORDS: Test bench – Tracers – Modeling.

1. Introduction

La protection des eaux souterraines nécessite l'évaluation des risques de pollution, notamment à partir des déversements accidentels. Leurs probabilités sont un facteur important pour la connaissance des mécanismes de transfert des substances polluantes en solution en milieu à perméabilité de fissures ou d'interstices. Ce travail mené sur banc d'essai au laboratoire d'hydrologie et d'hydrogéologie du département d'hydraulique de l'université de Tlemcen, a pour but de comprendre la migration des traceurs artificiels sélectionnés (Chlorure de Sodium, Rhodamine- B, et colorant textile) injectés dans une formation sableuse homogène. Le choix de ces trois traceurs est justifié par le fait qu'ils présentent des propriétés chimiques différentes (Yebdri, 2008).

Il s'agit d'analyser les mécanismes responsables du transfert des traceurs ainsi que d'estimer quantitativement, par des méthodes statistiques, les paramètres qui les décrivent, en relation avec la structure du milieu.

Pour compléter cette approche, la modélisation mathématique du transfert des substances chimiques a été envisagée, en utilisant le code « Aquifer Simulation Model », pour une confrontation avec les données expérimentales acquises.

2. Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai hydrologique est un appareil utilisé au laboratoire comme modèle réduit du système hydrologique, il sert à montrer, à petite échelle, quelques processus physiques concernant l'hydrogéologie (Figure 1).

Le banc est constitué essentiellement :

- D'un bassin de 1m de largeur, 2m de longueur, et de 15cm maximum de hauteur. Il est équipé de 2 puits de pompage et de 20 piézomètres liés à un manomètre, terminé à ses extrémités par deux canaux, l'un d'alimentation latérale, l'autre de décharge ou exutoire ;

- Des becs d'alimentation situés au dessus du bassin, simulent une alimentation pluviométrique ;

- Le réservoir de vidange placé au-dessous du bassin, assure l'alimentation et la récupération de l'eau.

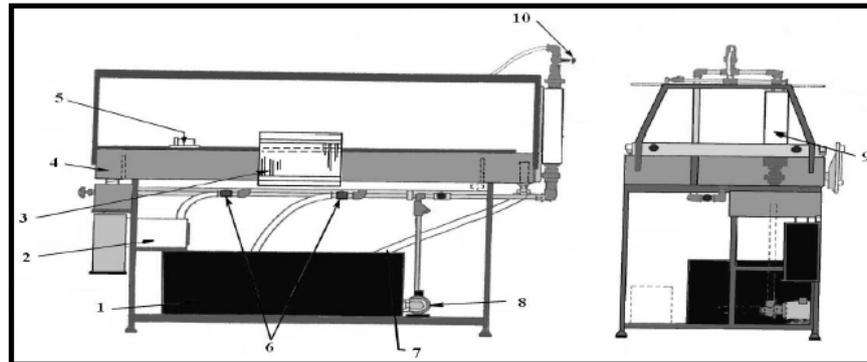


Figure 1. Représentation du banc d'essai hydrologique.

- (1) Réservoir, (2) Mesure du débit de sortie, (3) Piézomètres manométriques, (4) Banc d'essai hydrologique, (5) Bassin du banc d'essai hydrologique, (6) Vannes des puits de pompage, (7) Tuyau de décharge, (8) Pompe, (9) Régulateur de débit, (10) Vanne d'alimentation pluviométrique simulée.

3. Les essais hydrodynamiques

Les différents essais sont réalisés sur un milieu considéré comme homogène et continu sur une épaisseur de 15cm pour tout le bassin. Le matériau utilisé est un sable grossier assez uniforme d'une perméabilité moyenne de l'ordre de $6,25 \cdot 10^{-3}$ m/s déterminée conjointement par la méthode granulométrique et par mesure au perméamètre à charge constante.

La distribution et l'alimentation des eaux ont été assurées de manière latérale en amont du banc d'essai et sur toute l'épaisseur de la formation (milieu saturé), toutefois afin de réaliser un écoulement permanent ou d'équilibre, nous avons choisi un débit constant égal à 0,05 l/s (Débit d'entrée égale au débit de décharge). Les résultats de cet essai, ont donné la carte piézométrique (Figure 2).

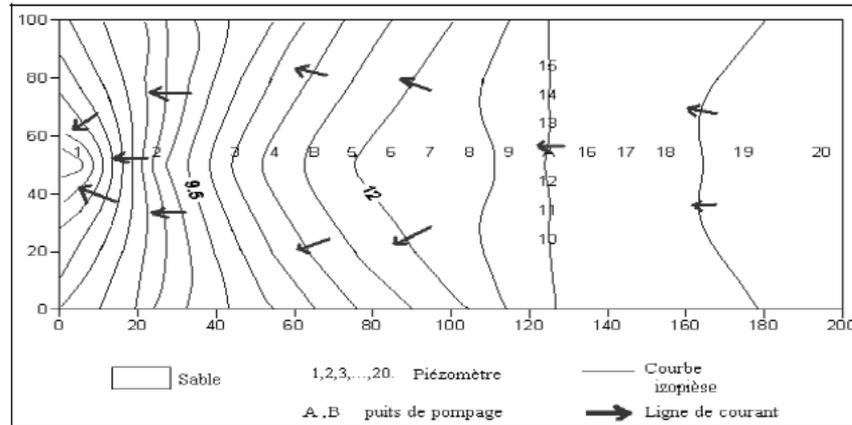


Figure 2. Carte piézométrique du bassin à nappe libre en régime permanent

Les caractéristiques hydrodynamiques ont été déterminées à partir de l'interprétation de plusieurs essais de pompage réalisés pendant une durée de 6 minutes sur les deux puits existants dans le banc d'essai et des mesures de rabattement au niveau des piézomètres influencés. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

- Transmissivité moyenne est de $3,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Coefficient d'emmagasinement moyen est de $0,8 \cdot 10^{-1}$; (cette valeur varie de 6% à 27% selon les puits de pompage A ou B et les piézomètres pris pour le calcul)
- Diffusivité moyenne est de $4,61 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

4. Les essais de traçage

La réalisation des essais de traçage sur le banc d'essai permet d'étudier l'évolution de la propagation de quelques traceurs dans ce milieu poreux. Ces essais ont été effectués suivant deux types d'écoulement :

4.1. Ecoulement monodimensionnel (écoulement naturel)

Il s'agit d'injecter en amont du banc d'essai par injection brève (instantanée) un traceur : Na Cl ($C_{\text{initiale}} = 20 \text{ g/l}$), Rhodamine-B ($C_{\text{initiale}} = 10 \text{ mg/l}$), et un colorant textile ($C_{\text{initiale}} = 50 \text{ mg/l}$), en le laissant progresser sous l'effet de sa propre vitesse. Le débit de

circulation a été fixé à 0,05 l/s et la solution est récupérée en aval du banc d'essai à une distance de 2m (Figure 3). Des échantillons sont prélevés et analysés, au fur et à mesure du passage du traceur. Les prélèvements se sont effectués après 5 minutes d'injection des chlorures de sodium, et 10 minutes pour l'injection des deux autres traceurs. On procède ensuite à l'établissement des courbes de concentration en fonction du temps et à leur interprétation.

4.2. *Ecoulement radial convergent*

Le traçage est réalisé grâce à des pompages continus à débits constants sur le puits B à une distance de 1,35m du canal d'alimentation. Les traceurs sont ceux précédemment utilisés : le NaCl, la rhodamine-B et le colorant textile (Tableau 1), injecté brièvement en solution en amont du banc d'essai (Figure 3).

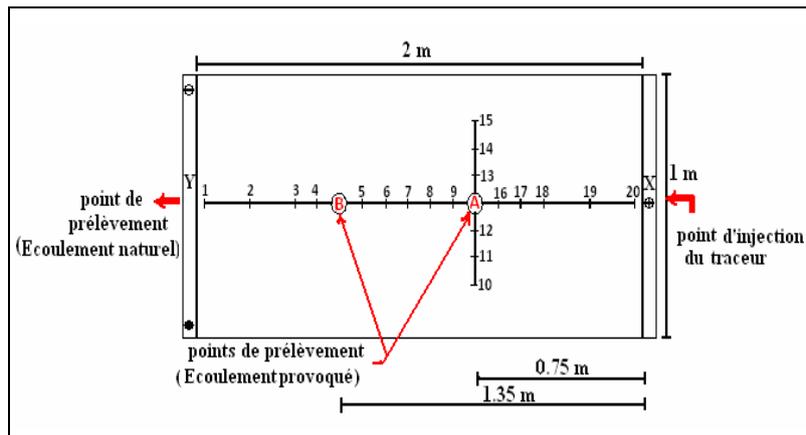


Figure 3. *Position des points d'injection et de prélèvement.*

Produit injecté	(NaCl)	Rhodamine –B	Colorant textile (polluant)
Conditions aux limites	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire
Débit d'alimentation	0,05 l/s	0,05 l/s	0,05 l/s
Lieu injection	X	X	X
Lieu de récupération	B	B	B
Débit de pompage	0,022 l/s	0,016 l/s	0,013/s
Masse injectée	500 g	0,1 g	0,5 g
Concentration initiale	50 g/l	10 mg/l	50 mg/l
Prélèvement après	5 min d'injection	05 min d'injection	3 min d'injection
Temps de restitution	300 min	165 min	200 min

Tableau 1. Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « B »

5. Résultats et interprétation

L'interprétation de ces essais de traçages réalisés sur le banc expérimental, repose sur l'établissement des courbes de restitution (concentration en fonction du temps), celles-ci permettent la déduction des temps caractéristiques (temps du pic t_{pic} , moyenne \bar{t} , temps de convection t_c , temps harmonique t_h et temps modal t_m) par l'utilisation de la méthode des moments (Wang 1987). La détermination des paramètres hydrodispersifs (coefficient de dispersivité α_l , dispersion longitudinale D_L et la vitesse de transfert V) est réalisée à l'aide de la méthode graphique linéaire (Wang 1987).

5.1. Essais de traçage en écoulement naturel

Les courbes de restitution des trois traceurs, montrent une évolution assez régulière de la concentration, avec des pics importants par rapport aux moyennes (Figure 4), suivis d'une décroissance régulière assez symétrique jusqu'à une certaine valeur minimale au-delà de laquelle on assiste à une certaine stabilité de la courbe pendant plus de 60mn., ce qui pourrait s'expliquer par un phénomène de diffusion aidé par le fait que l'entrée du traceur est assez lente.

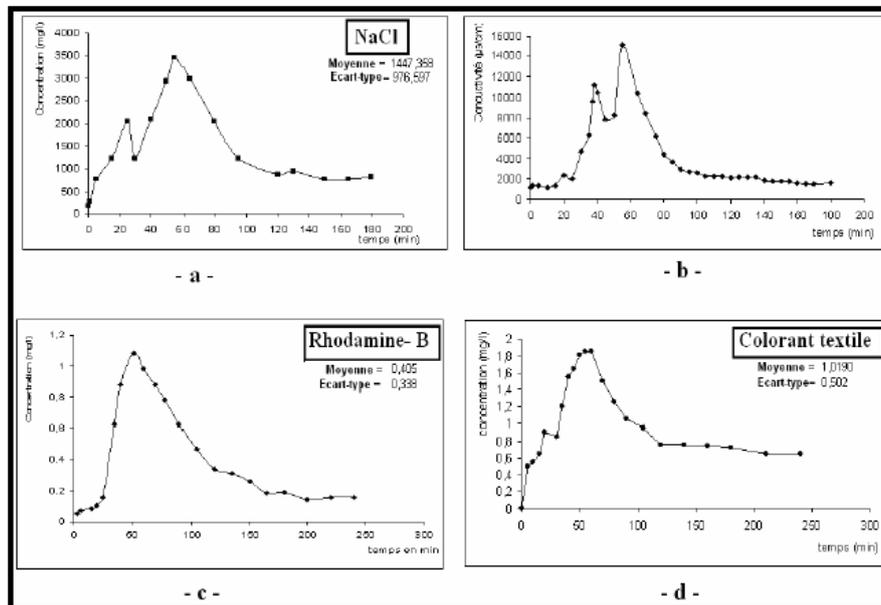


Figure 4. Courbes de restitution des traceurs injectés en amont du bassin.

Aussi, nous avons déterminé (Tableau. 2), les différents temps caractéristiques d'un transfert monodimensionnel lors d'une injection instantanée. Les temps caractéristiques des chlorures de sodium et du colorant textile sont proches et légèrement supérieurs à ceux trouvés avec la rhodamine – B.

Temps	NaCl	Rhodamine -B	Colorant textile
$t_{pic} (min)$	55	52	55
$t_c = t_h (min)$	142	123	136,46
$\bar{t} (min)$	220,23	175,56	212,27
$t_m (min)$	113,53	112	122

Tableau 2. Temps caractéristiques en écoulement monodimensionnel lors de l'injection instantanée des traceurs utilisés

5.2 Essais en écoulement radial convergent (provoqué)

Les courbes de restitutions de la figure 5, obtenues pour les trois traceurs au point de pompage « B », montrent une évolution régulière de la concentration en fonction du temps, avec des pics assez importants, traduisant l'homogénéité du milieu aquifère simulé.

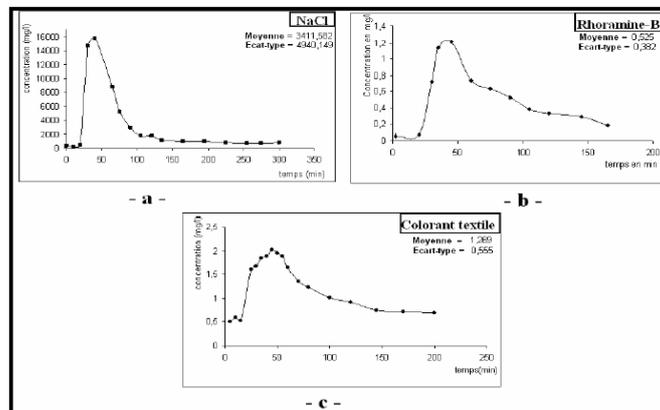


Figure 5. Courbes de restitution des traceurs injectés, en écoulement provoqué (Pompage au puits B).

Les temps de pic des concentrations des trois traceurs (tableau 3) sont pratiquement égaux. Le temps de convection des chlorures de sodium est inférieur par rapport à celui des deux autres traceurs. Pour NaCl et le colorant textile, les temps modaux et harmoniques ont des valeurs supérieures à celles trouvées pour la rhodamine- B.

Temps	NaCl	Rhodamine-B	Colorant textile
$t_{pic} (min)$	40	45	45
$t_c (min)$	72,74	80,94	104,92
$t_m (min)$	122	71,37	110,69
$t_h (min)$	116,69	98,92	182

Tableau 3. Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des trois traceurs.

5.3. Détermination des paramètres hydrodispersifs

Pour les différents essais de traçage réalisés sur le banc expérimental, les résultats (tableau 4) montrent qu'en écoulement monodimensionnel, les valeurs des coefficients de dispersivité (α_L) du chlorure de sodium et du colorant textile sont égaux et que celles de leur coefficient de dispersion longitudinale sont relativement proches, alors que pour la rhodamine-B les valeurs de ces mêmes coefficients sont légèrement plus faibles. Les vitesses de transfert (V) sont très élevées pour les trois traceurs par rapport à la vitesse fictive du flux d'eau en écoulement uniforme ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$), ce qui indique que le milieu possède une faible porosité. La valeur moyenne de la dispersivité autour de 0.5m est relativement forte pour les essais à l'échelle du laboratoire. On ne pourrait donc pas conclure un transfert par convection pure.

En écoulement provoqué, La valeur du coefficient de dispersivité (α_L) du colorant textile est plus élevée (0,5 m) que celles des chlorures de sodium et de la rhodamine-B (entre 0,15 et 0,22 m). Les valeurs des vitesses du transfert (V) des traceurs sont comprises entre $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ et $2,36 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, et celles de leur coefficient de dispersion longitudinale (D_L) entre $2,5 \cdot 10^{-3}$ et $6,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les paramètres hydrodispersifs de la rhodamine-B sont inférieurs à ceux des autres traceurs.

		C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc= \bar{t} (min)	V (m/s)	α_t (m)	D _L (m ² /s)
Écoulement naturel	NaCl	20	3450	3,63	142	2,34 10 ⁻⁴	0,55	1,29 10 ⁻⁴
	Rhodamine - B	0,01	1,08	4,68	123	2,71 10 ⁻⁴	0,42	1,15 10 ⁻⁴
	Colorant textile	0,05	1,85	3,6	136,46	2,44 10 ⁻⁴	0,55	1,35 10 ⁻⁴
Écoulement provoqué	NaCl	50	15790	6,79	57,19	2,36 10 ⁻²	0,22	5,2 10 ⁻³
	Rhodamine - B	0,01	1,212	9	80,94	1,16 10 ⁻²	0,15	2,5 10 ⁻³
	Colorant textile	0,05	2,025	2,72	104,92	1,28 10 ⁻²	0,50	6,38 10 ⁻³

Tableau 4. Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement naturel et provoqué (pompage puits B).

5.4. Comportement physico-chimique des traceurs injectés

L'évolution temporelle de la masse cumulée des différents traceurs, en écoulement naturel (Figure 6 -a-) et en écoulement radial convergent (provoqué) au niveau du puits «B» (Figure 6 -b-) présente pour les chlorures de sodium un taux de restitution très élevé (presque 100%) indiquant des propriétés conservatives (pas d'adsorption) sur une telle formation (Brouyere, 2001, Joerin, 2000, Mania, 2001).

Par comparaison, la rhodamine -B présente un taux de restitution de 85% pour l'écoulement monodimensionnel et un taux de 65% pour l'écoulement provoqué, cela pourrait s'expliquer par son caractère sorptif. (Brouyere, 2001 ; Hanich, 1991 ; Pang et al., 2004 ; Patriarche, 2001). Le colorant textile présente un taux de restitution faible (proche de 45%). La valeur de ce taux laisse supposer que ce polluant a des propriétés de sorption.

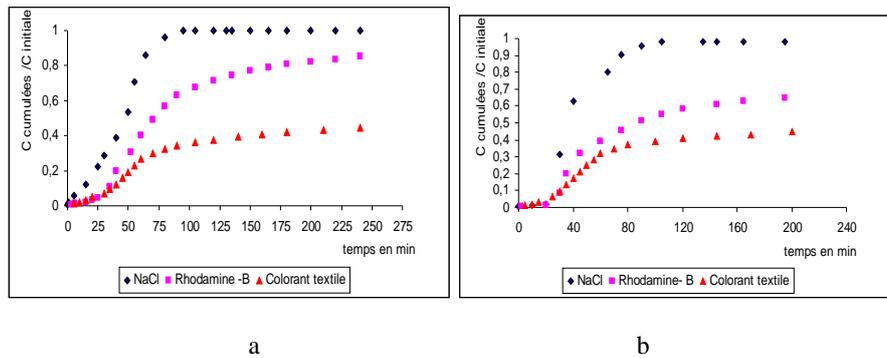


Figure 6. Courbes cumulatives des masses restituées des traceurs injectés en milieu homogène

6. Modélisation hydrodispersif

Nous avons utilisé le code de calcul aquifer simulation model (ASM5). Le modèle calcule les transports des polluants à partir des paramètres hydrodispersifs (Dispersivité longitudinale et transversale, Facteur de retard, Coefficients de dispersion et de distribution), des conditions aux limites et des concentrations imposés (Concentration imposée avant transport, généralement nulle, et concentration du flux entrant aux limites).

Ces transferts sont effectués, en réalisant de nombreuses simulations sur modèle hydrodynamique calé, au cours desquelles on change les polluants (traceurs) en variant leurs paramètres hydrodispersifs et leurs types d'écoulements (naturel et provoqué), de manière à observer l'évolution des concentrations de ces traceurs en fonction du temps et de la distance par rapport au point d'injection, représenté par (+) sur la figure 6. Les points d'observation sont implantés sur la trajectoire de l'axe de drainage à partir du point d'injection (Figure 7), suivant les positions [2, 5], [11, 5] et [20, 5].

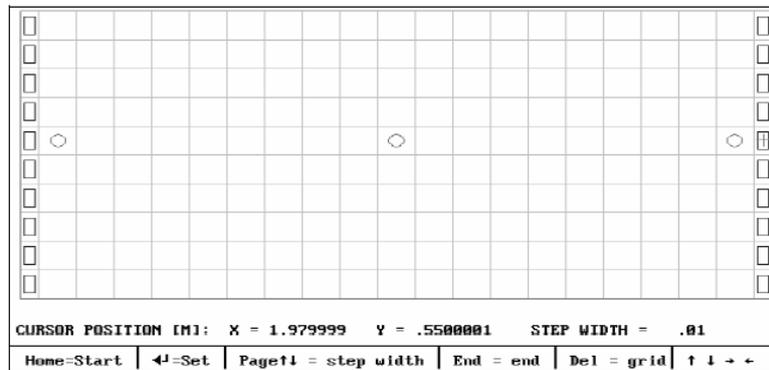


Figure 7. Position des points d'observation sur le domaine (Banc d'essai).

6.1. Interprétations des courbes de restitution calculées

6.1.1. Ecoulement naturel

Les courbes de restitutions simulées (Figure 8), montrent une évolution régulière des concentrations en fonction du temps. Les plus importants pics sont observés au point [20,5] à 10 cm du point d'injection. La forme plus aplatie des courbes aux mailles [11,5] et [2,5] s'explique par leurs positions plus éloignées respectivement de 100cm et 190 cm du point d'injection. Le temps de restitution est de 71 minutes pour le colorant textile, de 77 minutes pour NaCl et 107 minutes pour la rhodamine –B. La dispersion de la rhodamine –B est donc plus faible que celle du traceur NaCl et du polluant textile.

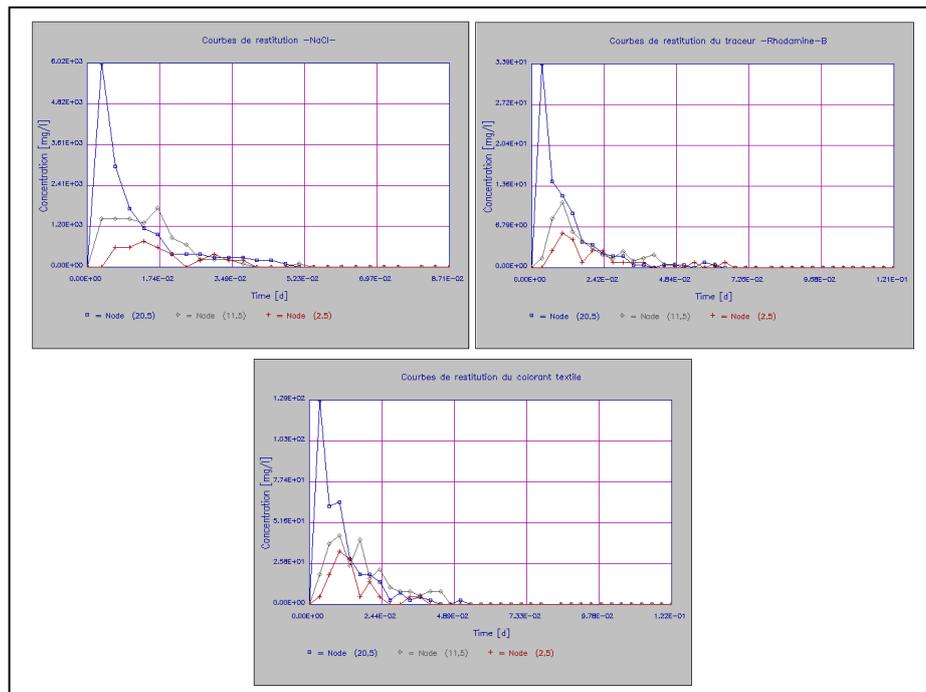


Figure 8. Courbes de restitution des traceurs (*NaCl*, *Rhodamine-B* et *Colorant textile*) dans les essais de traçage en écoulement naturel, données par le logiciel *ASM. 5*

6.1.2. *Écoulement radial convergent*

Les courbes calculées des Chlorures de sodium et des colorants textiles obtenues aux points [20, 5] et [11, 5] (Figure 9), montrent une évolution assez classique, une augmentation suivie d'une décroissance jusqu'au retour à la concentration brute. Au point [2, 5] les courbes présentent d'importantes fluctuations. Pour la *Rhodamine-B*, les courbes ont la même allure aux points [20, 5] et [11, 5], au point [2, 5] la restitution est quasiment nulle.

L'apparition des traceurs (*Chlorures de sodium* et *Colorant textile*) après le puits de pompage, ne peut être expliquée que par la rapidité de dispersion de ces deux traceurs, justifiée par leurs coefficients de dispersivité utilisés pour les calculs du modèle, qui sont important (entre 0,4 et 0,5) par rapport à celui de la *rhodamine -B* (0,15).

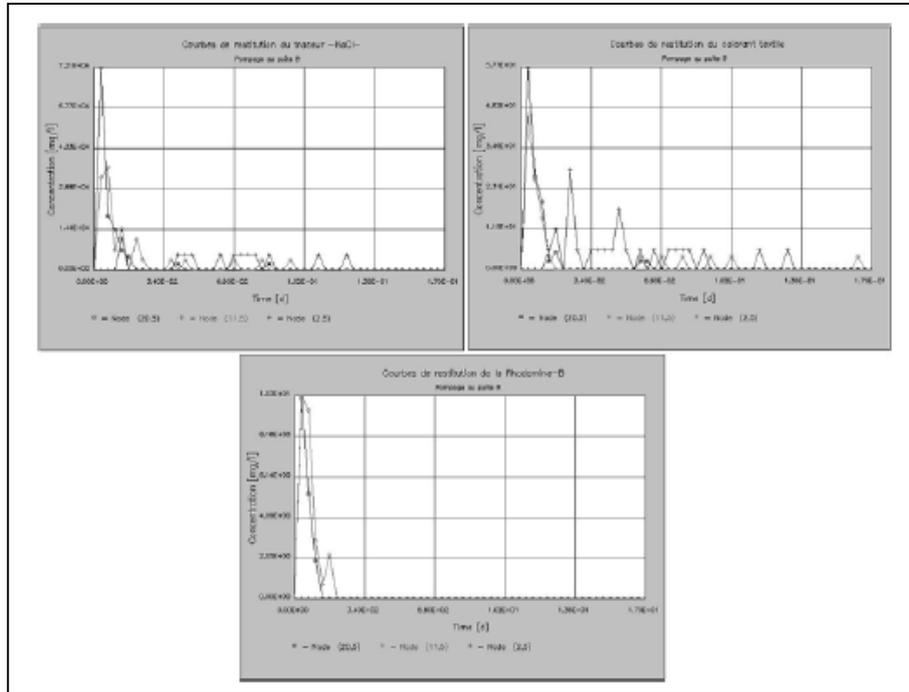


Figure 9. Courbes de restitution des traceurs (NaCl, Rhodamine-B et Colorant textile) dans les essais de traçage en écoulement radial convergent, données par le logiciel ASM5

7. Conclusion

Les différents essais de traçage réalisés sur le milieu homogène (formation sableuse), en écoulement naturel et convergent, montrent que la propagation des traceurs utilisés s'effectue principalement par convection, les vitesses de transit étant très rapides. Les taux de restitution des traceurs utilisés, montrent que le chlorure de sodium est un traceur conservatif et que la rhodamine –B et le colorant textile sont des traceurs à caractère sorptif.

Les différents essais de simulation de transport des polluants confirment les résultats des essais de traçage réalisés sur le banc.

Les courbes de restitution données par modèle hydrodispersif, montrent que la dispersion du colorant textile est la plus élevée, suivie de celle des chlorures de sodium, alors que la rhodamine –B présente des propriétés de dispersion beaucoup plus faible.

8. Bibliographie

- Brouyere S.. Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé. Evaluation des paramètres hydrodispersifs par la réalisation et l'interprétation d'essais de traçage in situ . Th. Doc. Sci. Appliquée. Univ. Liège 2001, 640 p.
- Hanich L., Les traçages d'essai en aquifère hétérogène : méthodes, intérêts et limites. Th. Doc. Univ. Sci. Lille, Flandres- Artois 1991, 165 p.
- Joerin C., Etude des processus hydrologiques par l'application du traçage d'essai environnemental. Association a des mesures effectuées à l'échelle locale et analyse d'incertitude. Th. Doc. Sci. Technique, Lausanne 2000., 220 p.
- Mania J., Théorie et modélisation du transport de masse pour une application au transport de contaminants, Cours, DEA génie civil, Ecole Doc. Génie civil, Lille 2001., 98 p.
- Pang L., Close M., Greenfield H. et Staton G.. Adsorption and transport of Cadmium and Rhodamine –WT in pumice sand columns, Vol. 38, Journ. Marine and Freshwater Research, Ed, Royal Society of New Zealand, 2004. pp. 367–378.
- Patriarche D., Caractérisation et modélisation des traceurs naturels dans les argilites de Tournemire. Th. Doc. Ecole des mines 2001., Paris, 260 p.
- Wang H.Q., Modélisation des transferts de masse en milieu saturé à double porosité. Application aux écoulements convergents en craie fissurée semi –confinée et multicouches. Th. Doc. Univ. Paris XI, Orsay 1987, 273p.
- Yebdri L ., L'étude du comportement de quelques traceurs en hydrogéologie sur banc d'essai au laboratoire. Mem. Magister univ. Tlemcen 2008, 101p.