



ETUDE DU TRANSFERT DES PARTICULES SOLIDES DANS LES EAUX SOUTERRAINES (MODELISATION AU LABORATOIRE)

KAZI TANI H.A.¹, BOUANANI A.², BABA-HAMED K.³

¹Laboratoire n°25, Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie,
Université de Tlemcen, Algérie.

²Laboratoire n°25, Département d'Hydraulique, Faculté des sciences de l'ingénieur,
Université de Tlemcen, Algérie.

³Laboratoire n°25, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Faculté
SNVTU, Université de Tlemcen, Algérie.

kazitanih@gmail.com

RESUME

Dans ce travail, nous présentons les résultats de l'étude expérimentale faite au laboratoire qui consiste à analyser le transport et le dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux saturé. Dans ce milieu, les particules en suspension peuvent être des vecteurs de pollution et des freins par leur dépôt. Par ailleurs, deux types de particules en suspension ont été utilisés dans cette étude : des particules argileuses et la chaux. Des injections brèves de solution de particules en suspension ont été réalisées sur une colonne au laboratoire remplie de deux types de sables de la région d'Adrar de granulométrie différente.

En utilisant l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt de premier ordre, nous avons pu interpréter les résultats de traçage et déterminer les paramètres hydro-dispersifs. Ainsi, les caractéristiques physiques du milieu poreux ont un rôle important dans la restitution des traceurs. La perméabilité, la porosité et la vitesse d'écoulement sont les paramètres déterminants qui favorisent le passage et/ou le colmatage, l'agglomération (rétention) ou le relargage (dispersion).

Mots clés : Colonne expérimentale, particules en suspension, vitesse d'écoulement, transport, dépôt.

ABSTRACT

The work carried out in this article relates to two sandy formations of physical characteristics (porosity, permeability, porous volume) different. Also, two types of tracers in suspended particles (clays and lime). The suspended particles are implied in many problems; such as the hydraulic works, the exploitation of the underground resources (hydrous and oil), the transport of the latter in water can be a vector of transport of contaminants or brakes by their deposition (filling of the pores). The experimental studies of transport in suspension and their deposition in our experimental column, were carried out in a laminar mode. The interpretation of the results of tracing obtained by using the equation convection-dispersion of first order; we allowed to determine the various parameters hydrodispersive. The various rates of flow used and cuts in particles are parameters which influence on transport and deposition. The rate of refund is function of the rate of flow and the porosity of the medium.

Keywords: Experimental column, Suspended Particles, Velocity of flow, transport, deposition.

INTRODUCTION

Les matières en suspension sont des particules infimes, leur transfert joue un rôle déterminant dans la contamination des aquifères, leur taille favorise l'adsorption des contaminants et elles peuvent migrer sur de longues distances (Tushar Kanti, 2006), elles peuvent jouer un rôle de véhicule si elles sont transportées facilement dans l'écoulement ou au contraire devenir un frein à la migration des polluants dans le cas où leur présence colmate rapidement les pores ; quand la dimension des particules en suspension est importante (Ahfir, 2006). Les particules en suspension ont aussi resurgi de l'érosion interne, qui est un mécanisme primordial des instabilités d'ouvrages hydrauliques en terre (Monnet, 1998).

Le transport ou la migration des particules ou des éléments chimiques dans un milieu poreux ou fissuré résulte de la combinaison de trois mécanismes principaux : La convection, qui est l'entraînement des particules à la vitesse moyenne du fluide, la dispersion cinématique engendrée par l'hétérogénéité de la vitesse réelle de l'écoulement dans le milieu poreux, par rapport à la vitesse convective moyenne (Beaudoin et al., 2008) et enfin la diffusion moléculaire qui transforme l'hétérogénéité de la concentration du milieu en concentration homogène dans tout l'espace poreux.

Vu la complexité du milieu naturel qui est purement hétérogène ; ce qui perturbe les champs des vitesses d'écoulement et des concentrations et qui rend l'analyse très difficile à mettre en œuvre, nous avons travaillé sur une colonne de sable saturé au laboratoire. Pour bien comprendre le phénomène nous avons

utilisé deux types de milieux poreux constitués de sables de caractéristiques physiques différentes, et deux matières en suspension différentes (Argile et Chaux). Les essais sont réalisés pour différentes vitesses d'écoulement qui ont donné les courbes de restitutions qui nous ont permis de calculer les paramètres hydro-dispersifs des milieux selon différentes approches.

MILIEUX, MATERIAUX ET MODELE EXPERIMENTAL

Milieu poreux utilisé

Le sable utilisé dans notre expérimentation est siliceux (Densité sèche constante après saturation), que nous avons ramené de la région d'Adrar (Lieux dit Bouda). Nous avons réalisé un trie pour constituer deux sables de granulométrie différente.

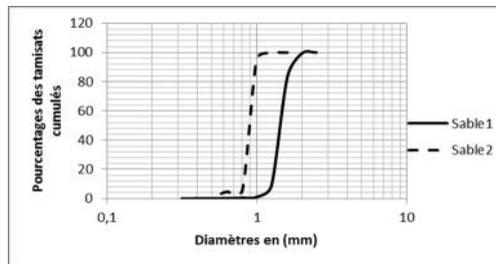


Figure 1 : Courbe granulométrique des deux milieux poreux

L'étude granulométrique des deux sables a permis de tracer les deux courbes granulométriques (Figure 1) à partir desquelles ont été déduites les caractéristiques physiques présentées dans le (Tableau 1). Le diamètre des grains du sable 1 est compris entre 0,63 et 2mm, et celui du sable 2 entre 0,8 et 1,2mm.

Tableau 1 : Valeurs des coefficients d'uniformité des deux formations et leurs diamètres et propriétés physiques et hydrauliques des deux milieux poreux.

	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Le coefficient d'uniformité <i>U</i>	Densité apparente (d _a)	Densité spécifique (d _s)	Porosité %	Perméabilité (m/s)
Sable 1	1,3	1,5	1,6	1,23	1,33	2,45	45	1,68.10 ⁻²
Sable 2	0,81	0,89	0,90	1,11	1,54	2,49	38	8,38.10 ⁻³

Les matériaux en suspension

Le choix des particules en suspension a porté sur des particules de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$ (Argile et chaux). La répartition des diamètres a été définie par sédimentométrie. La gamme de diamètres de notre suspension argileuse est poly-dispersive entre 76 et $1,42\mu\text{m}$; avec plus de 50% de l'échantillon de diamètre inférieur à $1,42\mu\text{m}$. D'après le spectre de taille (Figure 2), notre suspension comporte même des colloïdes.

L'étude de la taille des particules est importante pour faire le rapport particule-grain du milieu poreux afin d'étudier le phénomène de blocage (Sakthivadivel, 1969). En effet, le blocage se produit lorsque le rapport S_p/S_g est supérieur à $0,05$. La gamme des tailles des particules en suspension utilisées est largement inférieure à la taille moyenne des grains constituant les milieux poreux avec un rapport de S_p/S_g de l'ordre 10^{-6} .

La colonne d'expérimentation

Le dispositif expérimental (Figure 4) est composé de :

1. Un réservoir d'eau qui alimente la colonne, ce dernier est alimenté constamment à partir d'un robinet pour maintenir la charge d'alimentation constante.
2. Un tuyau de diamètre 17mm qui relie le réservoir à la colonne.
3. Une colonne en PVC de diamètre 50mm , de longueur 60cm fermée en ces deux extrémités par des filtres pour empêcher la perte des grains qui constituent le milieu poreux.
4. Une seringue à l'amont de la colonne pour l'injection de la suspension et le traceur
5. 4 piézomètres pour contrôler et maintenir la charge hydraulique à l'intérieur de la colonne, séparés d'une distance de $7,5\text{cm}$.
6. Un turbidimètre à la sortie de la colonne pour mesurer la turbidité et la traduire en concentration.

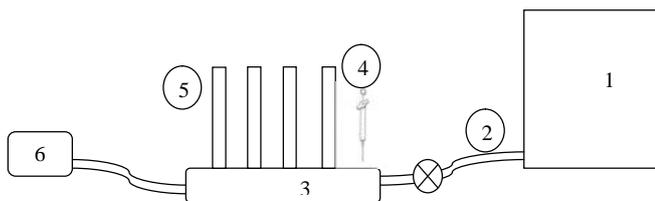


Figure 2 : Schéma de la colonne expérimentale

L'injection des particules en suspension

Notre choix s'est porté sur la méthode d'injection par impulsion. Une fois la colonne remplie horizontalement avec le matériau. On injecte notre suspension à l'aide d'une seringue, pour réaliser des impulsions. Le volume injecté doit être beaucoup plus petit que le volume des pores ($V_{inj} \ll V_p$) pour éviter la perturbation de l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux. La concentration en particules (argile ou chaux) injectées pour tous les essais est égale à 1 g/l.

METHODOLOGIE, RESULTATS ET DISCUSSIONS

La réalisation des essais de transport en suspension et de traçage dans une colonne au laboratoire, permet d'étudier l'évolution de la propagation des matières suspendues et des traceurs dans les différents milieux poreux. Ces essais sont basés sur des méthodes qualitatives qui identifient les paramètres régissant les écoulements souterrains (vitesse effective des eaux, propriétés hydro-dispersives). Il s'agit d'injecter en amont de la colonne une concentration de la suspension argileuse, ou de la chaux. Sous l'effet de différentes vitesses d'écoulements, mais toujours en régime laminaire, la solution est récupérée à la sortie de la colonne, à 60cm du point d'injection, et à différents temps.

Pour le calcul des paramètres hydrodispersives on a utilisé la méthode, dite analytique basée sur les solutions de l'équation de convection dispersion (1) en écoulement monodimensionnel, avec une cinétique de dépôt du premier ordre :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_{dep} C \quad (1)$$

Avec : D_L : La dispersion longitudinale, u : La vitesse effective, K_{dep} : Le coefficient de dépôt.

Les courbes de restitution (Figure 3) présentent l'évolution du rapport C/C_0 (Concentration en sortie de la colonne rapportée à la concentration initiale d'injection des argiles et de la chaux $C/C_0=f(t)$) pour trois vitesses en fonction du temps. Ces courbes montrent que :

Pour des mêmes vitesses d'écoulement, les temps d'arrivée des particules d'argiles sont légèrement inférieurs de ceux de la chaux. La dissolution partielle de la chaux conduit à l'adsorption, la diffusion moléculaire et la dispersion.

La surface de la courbe de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement ; cette dernière ne favorise pas le dépôt des particules.

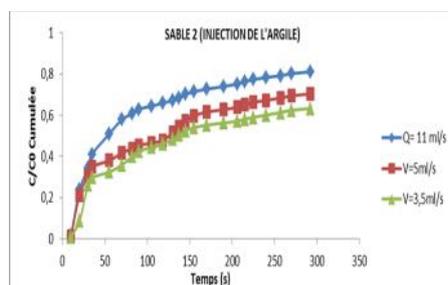
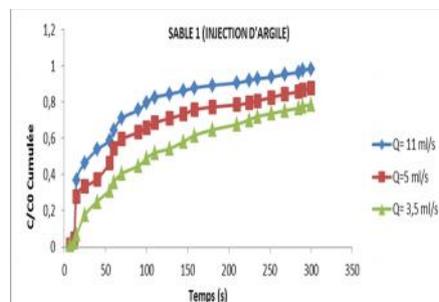
La restitution à travers le sable1 est légèrement plus élevée que celle à travers le sable2 ; la plus grande porosité et la perméabilité du milieu 1 permet un meilleur transfert des particules. En effet, le sable2 plus homogène favorise l'interception directe particule-grain solide et aussi l'adsorption pour la chaux.

Les perturbations observées au niveau des courbes de restitution, sont probablement dus au mauvais arrangement des grains, et peut être au relargage de matières en suspension déposées ou bloquées momentanément.

L'évolution temporelle des taux de restitutions des deux traceurs injectés, pour trois débits d'alimentation différents montre que :

- Pour $Q=1\text{ml/s}$ montre que dès la 1ere minute 60% des suspensions argileuses ou de chaux sont restituées. Après 2 minutes c'est 80% qui sortent. La vitesse de restitution diminue, et ce n'est qu'après plus de 5minutes que nous obtenons le maximum de restitution plus élevé pour le sable1 (98% pour les argiles et 90% pour la chaux) que le sable2 (81% pour les argiles et 78% pour la chaux).
- Pour $Q=5\text{ml/s}$ la restitution est de 40% après 1 minute, pour les deux suspensions et les deux échantillons, alors que le max de restitution est de 87% et 82% pour le sable1 respectivement pour l'argile et la chaux. Il atteint 70 et 65% pour le sable2.
- Pour $Q=3,5\text{ml/s}$ le même comportement est observé avec un taux de 30% en moyenne, dès la 1ère minute, un max de restitution allant de 78% à 60% (Tableau 3). La faible vitesse d'écoulement engendre le dépôt des suspensions dans le vide inter-granulaire et favorise la dissolution de la chaux.

Le tableau 2 des paramètres hydro-dispersifs et des taux de restitution montre que le coefficient de dispersion longitudinal, varie proportionnellement avec le débit d'alimentation ; l'augmentation de la vitesse d'écoulement favorise la dispersion des particules en suspension et de la chaux dans le milieu poreux. Nos deux milieux poreux avec une bonne perméabilité permettent une restitution très rapide. Le coefficient de cinétique dépôt ; ainsi que le temps de transfert par convection pur varie inversement avec la vitesse d'écoulement.



*Etude du transfert des particules solides dans les eaux souterraines
(Modélisation au laboratoire)*

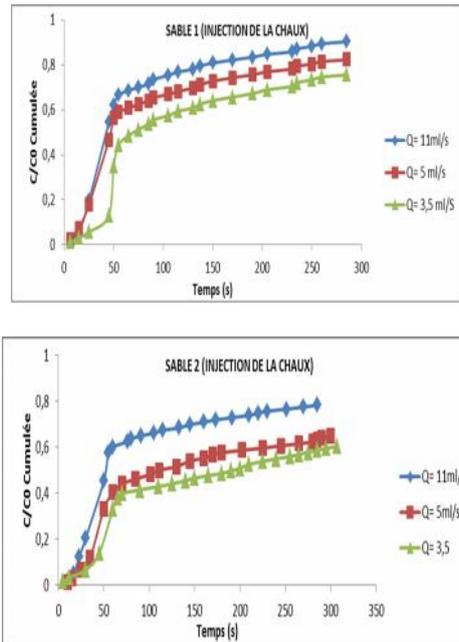


Figure 3 : Concentrations cumulées en fonction du temps (Kazi Tani, 2011)

Tableau 2 : Description des paramètres hydro dispersives et des taux de restitutions à partir de la méthode des moments (Kazi Tani, 2011)

	Débits d'alimentation (ml/s)	Temps de transfert t_c (s)	Taux de restitution R(%)	Variance réduite σ_R^2	Nombre de peclot P_e	Coefficient de dépôt K_{dep} (1/h)	Dispersion longitudinale D_L (cm ² /s)
Sable(1) ARGILE	11	81,42	98,45	0,8	2,46	0,68	13,65
	5	81,6	87,69	0,68	2,53	5,31	5,92
	3,5	104,23	78,63	0,358	5,1	7,26	2,12
Sable(2) ARGILE	11	63,15	81,09	0,79	2,13	10,41	15,77
	5	71,42	70,34	0,66	2,32	12,03	6,46
	3,5	76,61	63,29	0,56	2,65	14,07	4,07
Sable(1) Chaux	11	67,65	90,34	0,81	2,26	4,8	14,86
	5	71,61	82,36	0,73	2,35	7,78	6,38
	3,5	92,19	75,57	0,47	3,69	8,88	2,92
Sable(2) Chaux	11	65,43	78,22	0,699	2,36	14,67	14,23
	5	69,96	64,76	0,57	2,63	15,18	5,7
	3,5	71,73	60,24	0,58	2,43	15,56	4,44

CONCLUSION

A travers l'expérience dans une colonne au laboratoire, l'étude du transport de l'argile et de la chaux dans un milieu poreux saturé a permis d'établir des particularités propres aux deux types de sables (Courbes granulométriques) et aux deux matières en suspension. Les essais sont effectués avec des vitesses qui

dépassent celles présentes dans les milieux naturels, tout en restant dans le domaine de Darcy.

Cette étude a permis de montrer que les caractéristiques physiques du milieu poreux ont un rôle important dans la restitution des particules en suspension. La perméabilité, la porosité et la vitesse d'écoulement, sont des paramètres qui en premier lieu favorisent le passage et/ou le colmatage, l'agglomération (rétention) ou le relargage (dispersion). Le sable1 de perméabilité $1,68.10^{-2}m/s$ a permis une restitution plus signifiante que le Sable2 ; ce qui implique que la porosité du milieu joue un rôle important au passage des contaminants.

Les injections instantanées effectuées séparément avec les matières en suspension (argiles et chaux) pour les différentes vitesses d'écoulement ont montré que les d'argiles sont transportées plus rapidement que la chaux ; en effet, cette dernière est partiellement dissoute ou déposée dans le milieu poreux. La vitesse d'écoulement est l'un des paramètres important dans cette étude, en effet :

- Le taux de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement. Ainsi, pour les petites vitesses et sous l'effet de la densité les particules d'argiles sont entraînées vers le fond de la colonne réduisant ainsi le taux de restitution. Toutefois, la solubilité partielle de la chaux ne permet pas une restitution maximale à la sortie de la colonne.

- Le coefficient de dispersion D_L est proportionnel à la vitesse d'écoulement, les valeurs obtenues pour les deux suspensions sont proches.

- La rétention et/ou le dépôt des particules dans le milieu poreux est caractérisée par le coefficient cinétique de dépôt. Ce coefficient est inversement proportionnel à la vitesse d'écoulement.

Les paramètres hydro-dispersifs calculés par les deux méthodes, sont basées sur la valeur du nombre de pécelet, le temps de transfert, et le dépôt.

Cette étude a permis de réaliser une modélisation analytique simple pour le transport et le dépôt de particules en suspension dans un milieu poreux saturé. Les paramètres hydrauliques, géométriques et physiques influent sur le transfert et la rétention des particules solides.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AHFIR N.D. (2006). Etude des mécanismes de transport et de la cinétique de dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux saturé, Thèse de Doctorat, Université du Havre, France, 179p.

BEAUDOIN et al. (2008). Dispersion dans les milieux hétérogènes, XXVI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 4 au 6 juin, Nancy, 485-505.

KAZI TANI H.A. (2011). Etude du transport en suspension dans un milieu poreux saturé au laboratoire, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 121p.

- MONNET A. (1998). Boullance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement, Revue Française de géotechnique, n° 82, 3-10.
- SAKTHIVADIVEL R. (1969). Clogging of granular porous medium by sediment, Eng. Lab., University of California, Berkeley, 106 p.
- TUSHAR KANTI S., KHILAR K.C. (2006). Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media, Advances in Colloid and Interface Science, Vol.119, Issues 2-3, 71-96.