

Effet de la vitesse d'écoulement sur la dynamique de transport des microparticules dans des lits de sable et de gravier

Zyed Mesticou^{1,*}, Mariem Kacem¹

(1) Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes UMR 5513, 58 rue Jean Parrot, Saint Etienne 42023 France

* Auteur correspondant : zyed.mesticou@enise.fr

RÉSUMÉ

Dans cette étude, des essais de colonnes sont conduits pour investiguer les effets de la vitesse de l'écoulement sur la dynamique de transport des particules à l'échelle micrométrique (diamètre moyen $11 \mu\text{m}$) à travers des milieux poreux à différentes tailles granulométriques sous des conditions saturées. Une étude comparative de l'influence de la forme des grains du milieu poreux sur l'effet de la vitesse critique est réalisée. Différents débits sont appliqués en prenant en considération un milieu à granulométries fine et grossière dans l'objectif de mettre en évidence l'effet du rapport de tailles des particules et des grains. Les résultats expérimentaux montrent une diminution du taux de rétention de particule avec l'augmentation de la vitesse pour les deux milieux : sable et gravier. La dynamique de dépôt diffère avec une saturation progressive des sites de rétention dans le cas du milieu fin, un comportement qui s'amplifie avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement et en résulte une diminution de la cinétique de dépôt. En contrepartie, la cinétique de saturation des sites de rétention est moins rapide en raison de l'hétérogénéité de la taille des grains en dépit d'une porosité similaire.

MOTS-CLÉS :

micro-particules, taille de grain, vitesse d'écoulement, dépôt de matériaux, milieu saturé

ABSTRACT

In this study, columns experiments are performed to investigate the effects of the flow velocity on the dynamics of particle transport at the micrometric scale ($11 \mu\text{m}$ in diameter) through porous media with various particle sizes under saturated conditions. A comparative study is conducted to characterize the influence of grain shape of the porous media on the critical velocity. Various flows are applied by considering porous bed with fine and coarse size grading at the aim to highlight the effect of the ratio of particle size to that of the grains. The experimental results show a decrease of the retention rate of particle with the increase of the velocity for both materials: sand and gravel. The dynamics of deposit differs with a progressive saturation of the retention sites in the case of the fine media, which increases with the increase of the flow velocity and results from it a decrease of the deposit kinetics. In opposite, the saturation of the retention sites is less fast with a constant retention rate because of the heterogeneity of the grains size despite a similar porosity.

KEYWORDS: micro particles, particle size, flow velocity, material deposition, saturated media

Effet de la vitesse d'écoulement sur la dynamique de transport des microparticules dans des lits de sable et de gravier

Zyed Mesticou, Mariem Kacem

Introduction

Le transport de microparticules et des colloïdes, en lien avec l'érosion des sols, est un facteur de dispersion des polluants dans les sols et l'environnement. Les particules transportées par le flux d'écoulement peuvent en effet agir comme vecteur de mobilité des polluants (métaux lourds, bactéries, radionucléides...) s'opposant aux mécanismes de sorption à l'interface liquide/phase solide du sol qui permettent la rétention des particules (Grolimund *et al.*, 1996 ; Kretzchmar *et al.*, 1999).

Il est connu que ce transport peut être influencé par les conditions hydrodynamiques et la composition chimique du flux de suspension et du milieu poreux. Plus spécifiquement, ces conditions affectent de manière significative les mécanismes de rétention et de relargage.

Des études sont réalisées sur l'influence de la vitesse d'écoulement sur le transport des particules dans deux milieux poreux. Pour les particules de taille « intermédiaire » ($1 \mu\text{m} < d < 30 \mu\text{m}$), la filtration est induite par deux mécanismes : filtration mécanique et filtration physicochimique conclues par de nombreux travaux (Herzig, *et al.*, 1970 ; McGechan *et al.*, 2002 ; Mesticou *et al.*, 2016). Dans nos précédents travaux (Mesticou *et al.*, 2012), il est démontré que les particules en suspension changent de comportement au-delà d'une certaine vitesse critique et deviennent plus lentes. Certains travaux se sont intéressés au lit poreux avec une approche expérimentale et de modélisation en utilisant du sable fin et du sable grossier (Ma *et al.*, 2018). Les propriétés de transport déduites ont

montré une variation linéaire selon la valeur de la taille des grains avec des tailles des sables utilisés variant entre $315 \mu\text{m}$ et $800 \mu\text{m}$. Le présent travail vise principalement à étudier l'effet de la vitesse d'écoulement en fonction de la taille des grains du lit poreux en utilisant du gravier et du sable, deux milieux granulaires de tailles de grains contrastées. L'influence de la forme des grains sur la vitesse critique est également vérifiée par des tests comparant des résultats sur du gravier à ceux sur de billes de verre.

I. Matériels et méthodes

Les microparticules en suspension (MES) sont composées de microparticules de silice S400 (Fulchiron Industrial SAS, France). À l'échelle de ces microparticules limoneuses, le phénomène de sédimentation peut être négligé. Deux types de milieux poreux ont été testés expérimentalement dans cette étude : gravier concassé et sable Hostun HN 31 (Sibelco, France). Un lit de billes de verre a aussi été utilisé pour simuler un milieu de taille des grains proches de celle des graviers mais de forme géométrique différente. Ce milieu sert de milieu de référence. Les grains de milieux poreux sont initialement prélevés avec de l'eau déionisée. Le rapport de taille de MES sur taille de grains dans le cas du gravier et du sable est respectivement de $2,9 \cdot 10^{-3}$ et $3,89 \cdot 10^{-4}$. Le tableau 1 présente les différentes propriétés des milieux utilisés.

Les essais en colonne sont effectués dans des conditions chimiques et hydrodynamiques constantes avec une température ambiante ($T = 22^\circ\text{C}$). Toutes les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 1. Propriétés des granulats utilisés.

Propriétés	Milieu poreux			Microparticules
	Sable	Gravier	Billes de verre	Silice
Diamètre d_{MP} (mm)	0,2 – 0,55	2,5 – 3,15	2-3	$1,3 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}$
Diamètre médian d_{50} (mm)	0,375	2,8	2,35	$11 \cdot 10^{-3}$
Masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2675	2791,4	2540	2675
Conductivité hydraulique k_0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	-
Porosité Φ (-)	$0,43 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,02$	$0,376 \pm 0,02$	-

Tableau 2. Conditions expérimentales.

	Colonne 1 : 19 cm de hauteur				Colonne 2 : 60 cm de hauteur
Milieu poreux	Gravier		Billes de verre		Sable Hostun
de Darcy (cm.s^{-1})	0,0079		0,015		0,0454
	0,0119				0,0519
	0,0159				0,0601
	0,0198				0,0697
	0,0294				
	0,0353				
C_0 (g.L^{-1})	0,3	0	0,3	0	1
$C_{0\text{NaCl}}$ (g.L^{-1})	0	0,4	0	0,4	0

L'injection continue de la solution aqueuse chargée en MES est réalisée à travers une colonne initialement saturée, disposée verticalement, avec un écoulement ascendant à débit constant et un pH neutre. Un suivi continu de la turbidité de l'effluent en MES est réalisée avec un turbidimètre (Turbimax CU21 Endress-Hauser) pour le suivi d'éluion en sortie de colonne et ainsi caractériser la rétention de microparticules à travers le milieu poreux. Dans une première configuration, des injections sont faites à travers un milieu poreux de 19 cm de hauteur pour une durée maximale de 17 minutes avec une concentration de MES : $C_0 = 0,3 \text{ g.L}^{-1}$. Différentes vitesses de Darcy sont appliquées. Des essais de traçage sont également effectués avec une concentration en chlorure de sodium $C_{0\text{NaCl}}$ de $0,4 \text{ g.L}^{-1}$. Dans la deuxième configuration, une colonne de sable Hostun de 60 cm de hauteur est utilisée. Quatre vitesses de Darcy sont appliquées. La concentration C_0 en MES utilisée de la solution injectée est de 1 g.L^{-1} sans ajout de fond ionique ($C_{0\text{NaCl}} = 0 \text{ g.L}^{-1}$). Ce choix est effectué à partir d'une étude paramétrique (Mesticou et al., 2012, Mesticou et al., 2016) et en accord avec des travaux antérieurs (Repentigny et al., 2014). Le choix d'une concentration plus importante dans le cas du milieu fin est fait pour favoriser le dépôt dans le cas des volumes d'injection largement plus importants, ceci a fait l'objet d'étude des travaux de Mesticou et al., 2016.

2. Résultats et discussion

2.1. Influence de la forme géométrique des particules du milieu poreux sur la vitesse critique

La vitesse critique est la vitesse au-delà de laquelle il y a une restitution des particules plus rapide que celle du traceur (Mesticou et al., 2012). Une injection d'une suspension chargée de microparticules est réalisée à une vitesse de Darcy de $0,015 \text{ cm.s}^{-1}$ ainsi que l'injection d'un traceur dans les deux milieux poreux : de gravier et de billes de verre (figure 1).

Dans le cas de lit de graviers, la restitution des particules est plus rapide que le traceur, l'hétérogénéité des grains dans ce milieu pourrait conditionner une porosité moins tortueuse et favoriser les écoulements préférentiels. Pour les billes de verre, le milieu est plus dispersif vu leurs formes sphériques permettant un arrangement régulier et un écoulement plus homogène, ainsi le comportement des MES se rapproche de celui du traceur, avec une atténuation de cet effet « vitesse critique ». Ce résultat montre que la percée plus rapide des microparticules est plus marquée en présence d'hétérogénéité du milieu et en particulier dépend de la forme des grains.

2.2 Influence de la vitesse de particule sur la dynamique de transport de particules

La figure 2 montre les courbes de restitution de MES en fonction du volume poral pour les deux milieux poreux : gravier et sable. Pour les deux milieux, le taux de restitution des MES montre une évolution typique avec une augmentation en fonction de la vitesse d'injection. Le taux de restitution atteint une valeur constante pour les différentes vitesses appliquées. Ceci s'explique par l'abondance des sites de rétention en particulier avec l'hétérogénéité des grains et donc une distribution anisotrope de la porosité. La rétention peut être limitée à la rétention mécanique (interception, déformation, calage) au premier ordre puis à la rétention physico-chimique dans un second ordre, en raison des faibles forces ioniques appliquées (Mesticou et al., 2016). L'atteinte du taux de restitution constant est plus rapide pour les graviers par rapport au sable. Ce qui peut s'expliquer par la création d'autres sites de rétention dans le temps, en particulier avec l'hétérogénéité du milieu poreux. Le taux de restitution et donc la saturation du site de rétention augmentent avec le débit. Ceci s'explique par l'augmentation de la cinétique de dépôt et aussi par l'amplification des forces hydrodynamiques par rapport aux forces d'attraction de Van Der Waals et aux forces de gravité. De plus, l'augmentation de la vitesse d'écoulement conduit, à faible force ionique, à

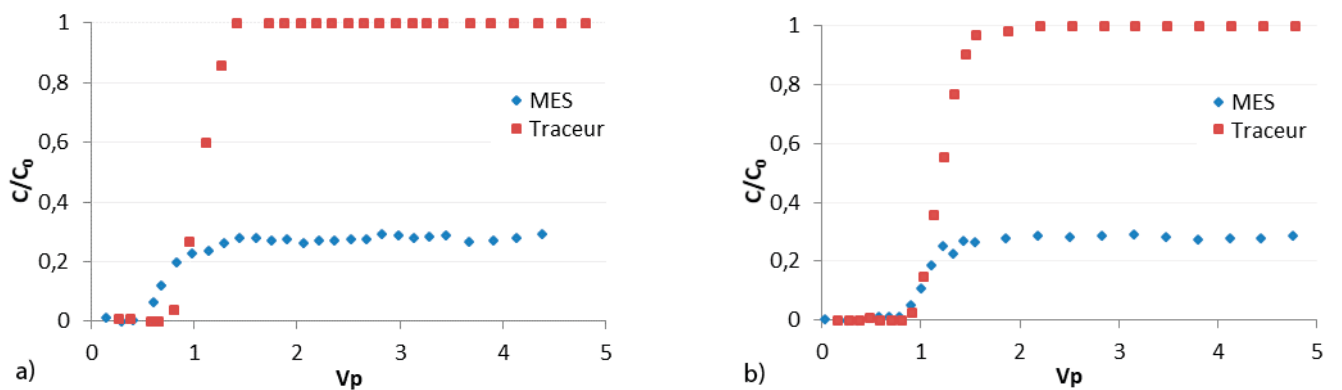


Figure 1. Concentration normalisée C/C_0 en fonction du volume poreux V_p ($u_d = 0,015 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $C_{0\text{NaCl}} = 0,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; $C_0 = 0,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; (a) : lit de gravier, (b) : lit de billes de verre)

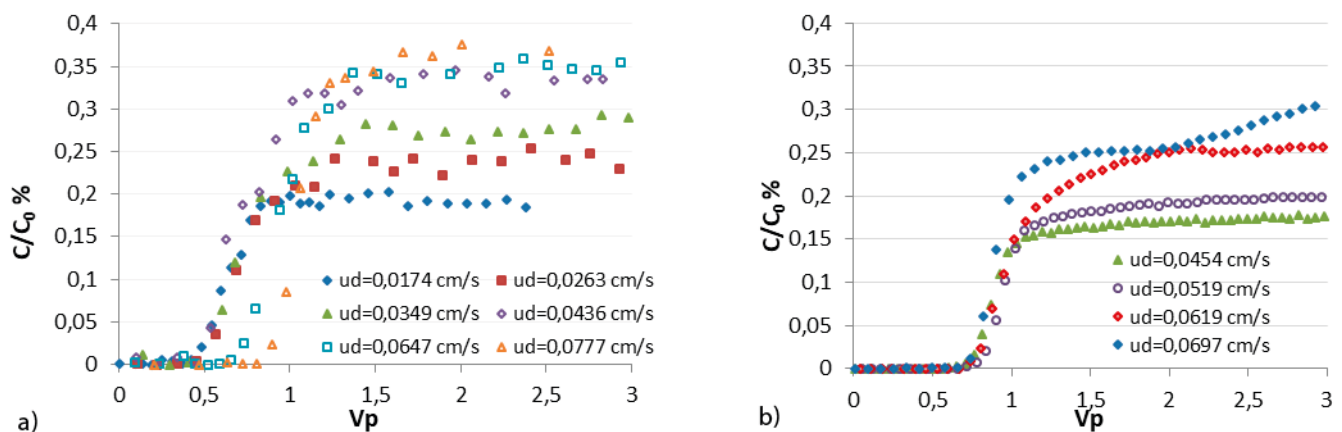


Figure 2. Influence de la vitesse d'écoulement sur le taux de restitution des MES sur (a) lit de gravier, (b) lit de sable ($C_{0\text{NaCl}} = 0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; $C_0 = 1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)

l'extension de l'épaisseur de la double couche et favorise ainsi les interactions répulsives (Ryan, *et al.*, 1996). Par conséquent, il y a moins de particules qui se déposent sous l'effet de forces physico-chimiques. Les forces hydrodynamiques conduisent à la migration des particules de silice par des voies préférentielles dans lesquelles elles sont moins susceptibles de se déposer. Par ailleurs, pour les deux plus hautes vitesses appliquées pour le gravier, le taux de restitution augmente à un instant plus tardif par rapport aux autres vitesses appliquées. Ces deux vitesses sont supérieures à la vitesse critique du lit de graviers située entre $4,36 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$ et $6,47 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$ d'après Mesticou *et al.* (2012). Dans le cas du sable, les vitesses appliquées sont toutes inférieures à la vitesse critique au-delà de laquelle devrait s'opérer un changement du comportement hydrodynamique des particules en suspension.

Dans le cas du sable Hostun (figure 2.b), il est remarqué pour la vitesse la plus importante que le taux de restitution tend à rester constant dans un premier temps suivi d'une augmentation progressive. Cette évolution est due d'abord à la saturation progressive des sites de rétention mécanique, compte tenu de la plus petite taille des grains (tableau 1), mais aussi des sites de rétention physico-chimiques encore limités puisque les expériences sont réalisées à force ionique nulle. Ce

phénomène n'est pas observé dans le cas de lits de graviers vu la taille importante des grains avec une distribution de taille de pores plus large induisant une cinétique de saturation de site de rétention plus lentes.

Il faut noter que malgré le fait que le rapport des diamètres de grains diminue et que la concentration de particules injectée augmente, le taux de restitution moyen est similaire pour les deux milieux.

Conclusion

Les essais de colonnes conduits dans le cadre de ce travail montrent que la valeur de la vitesse critique au-delà de laquelle la dynamique de transport des particules en suspension change reste dépendante de la forme des grains et de la nature du lit poreux. En outre, le transport de particules en suspension vérifie globalement le même comportement sous l'effet de la vitesse d'écoulement sous des conditions saturées que ce soit dans le cas du milieu poreux à granulométrie fine ou grossière. Il y a une diminution du taux de rétention avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement. Néanmoins, la dynamique de dépôt présente un comportement différent

notamment avec une saturation progressive des sites de rétention mécaniques et physico-chimiques. Dans le cas d'un milieu poreux avec des grains fins, la dynamique de transport est marquée par une augmentation du taux de dépôt avec la vitesse d'écoulement accompagné de la diminution de la cinétique de dépôt alors que la saturation des sites de rétention se manifeste lentement vu l'hétérogénéité des grains même pour une porosité similaire.

Références bibliographiques

- Grolimund, D., Brokovec M., Barmettler K., Kretzschmar R., et Sticher H., (1996). Colloid facilitated transport of strongly sorbing contaminant in natural transport porous media: A laboratory column study, in *Environmental science and technology*, vol 30 issue 10, pp. 3118-3123 <https://doi.org/10.1021/es960246x>
- Herzig, P.J., Leclerc D., et Le Goff P., (1970). Flow of suspensions through porous media. Application to deep filtration in *Industrial and engineering Chemistry*, vol 62, n° 5, pp. 8-35 <https://doi.org/10.1021/ie50725a003>
- Kretzschmar, R., Borkovec M., Grolimund D., et Elimelech M., (1999). Mobile surface colloids and their role in contaminant transport in *Advances in Agronomy*, vol 66, pp. 121-193 [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60427-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60427-7)
- McGechan, M.B., et Lewis D.R., (2002). SW—Soil and Water: Transport of Particulate and Colloid-sorbed Contaminants through Soil, Part 1: General Principles in *Biosystems Engineering*, vol 83, issue 3, pp. 255–273 <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0125>
- Ma, E., Ouahbi, T., Wang, H., Ahfir, N. D., Alem, A., & Hammadi, A., (2018). Modeling of the transport and deposition of polydispersed particles: Effects of hydrodynamics and spatiotemporal evolution of the deposition rate, *Environmental Pollution*, vol 237, pp. 1011-1022 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.017>
- Mesticou, Z., Kacem, M., and Dubujet, P., Mise en évidence de la vitesse critique dans le transport des micro-particules dans le milieu poreux : Expérience et modélisation. *XX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil Chambéry*, 2012
- Mesticou, Z., Kacem, M., and Dubujet, P., (2016). Coupling Effects of Flow Velocity and Ionic Strength on the Clogging of a Saturated Porous Medium, *Transport Porous Media*, vol 112, n° 1, pp. 265-282 <https://doi.org/10.1007/s11242-016-0644-8>
- Repentigny, C., Courcelles, B., (2016). A simplified model to predict clogging of reactive barriers. *Environmental Geotechnics*, vol 3 issue 3, pp. 166-177 <https://doi.org/10.1680/envgeo.14.00020>
- Ryan, J.N., et Elimelech, M., (1996). Colloid mobilization and transport in groundwater in *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, vol 107, pp : 1-56 [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03384-x](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03384-x)

