



Etude de la conductivité hydraulique des mélanges à granulométrie étalée

Kouadio Koffi^{1A}

Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, Canada

Michel Aubertin^{1A}, Maria A. Hernandez¹, Mariam Ouangrawa¹, Robert Chapuis¹ & Bruno Bussiere^{2A}

¹*Département des génies civil, géologiques et des mines – Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, Canada*

²*Département des Sciences appliquées – Université d'Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Québec, Canada*

^A*Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT, Environnement et gestion des rejets miniers*

ABSTRACT

The hydraulic properties of two types of particle mixtures (sand-gravel and tailing-sand) have been studied. Their porosity n (or void ratio e) was calculated using two predictive models: one is based on the ideal packing theory and the other on the theory of mixture. The porosity is in turn used to predict the saturated hydraulic conductivity k_{sat} of widely distributed grain-size mixtures with the Kozeny-Carman modified (KCM) model. A relatively good agreement is obtained between the predicted k_{sat} values and the measured values. However other factors influencing the behaviour of mixtures should be taken into account to improve the prediction.

RÉSUMÉ

Les propriétés hydriques de deux types de mélanges de particules (gravier-sable et résidus miniers-sable) ont été étudiées. La porosité n (ou l'indice de vide e) a été prédite à partir de deux modèles : un modèle est basé sur l'arrangement idéal des particules et l'autre est basé sur la théorie des mélanges. La porosité est utilisée pour prédire la conductivité hydraulique saturée k_{sat} des mélanges à granulométrie étalée en utilisant le modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM). Les résultats révèlent une assez bonne corrélation entre les valeurs de k_{sat} prédites et les valeurs mesurées. Toutefois, d'autres facteurs qui influencent le comportement des mélanges devraient être pris en compte pour améliorer la qualité des prédictions.

1 INTRODUCTION

Réaliser des mélanges de matériaux particuliers est une pratique courante dans les activités humaines (Yu et al, 1997; Finkers et Hoffmann, 1998 ; Vallejo, 2001). Ces mélanges sont souvent faits de particules de différentes formes et tailles. Le dosage affecte les propriétés obtenues. Les propriétés physiques et hydriques (densité, porosité et conductivité hydraulique) dépendent alors de l'arrangement des particules. Par exemple, lorsqu'un arrangement optimal est atteint, l'ensemble des vides entre les particules est fortement réduit et la densité du matériau est maximale (Jones et al. 2002). Plusieurs modèles de prédiction de la porosité n (ou de l'indice de vide e) basés sur les propriétés de base de chacune des composantes du mélange ont été proposés ; mentionnons par exemple le modèle de mélange linéaire de Yu et Sandish (1991, 1996), le modèle de prédiction de la porosité de mélanges sable et argile de Chen et Nur (1994), le modèle d'arrangement fractionnel des particules de Koltermann et Gorelick (1995) et sa version modifiée par Kamann et al. (2007). Ces modèles peuvent être utilisés pour réaliser un mélange de caractéristiques visées à partir des particules choisies. Ils peuvent aussi théoriquement être utilisés pour prédire le comportement d'un matériau à granulométrie très étalée (telles les roches stériles) à partir des propriétés des fractions qui le composent.

D'autres part, diverses formules de prédiction de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} ont été élaborées à partir des propriétés de base de matériaux. Plusieurs de

ces formules ont été analysées et discutées dans la littérature (e.g. Chapuis et Montour, 1992 ; Tiejie et Hennings, 1996 ; Aubertin et al. 1996 ; Mbonimpa et al. 2002 ; Chapuis et Aubertin, 2003 ; Chapuis et Aubertin, 2008).

L'objectif de ce travail est d'évaluer si on peut prédire la conductivité hydraulique d'un mélange de particules à partir des propriétés de base des fractions qui composent le mélange. Pour ce faire, la porosité (ou l'indice de vide) de différents mélanges de particules ont été prédits à partir de modèles basés sur l'arrangement idéal de particules et sur la théorie des mélanges. A partir de la porosité obtenue, la conductivité hydraulique est prédite en utilisant le modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) (Mbonimpa et al. 2000, 2002). Les valeurs de conductivité prédites sont comparées à celles directement mesurées.

2 CARACTERISTIQUES DES MÉLANGES

Deux types de mélanges ont été étudiés au laboratoire. Les mélanges préparés par Hernandez (2007) sont composés d'un sable et d'un gravier. A partir de ces deux matériaux de base, différents mélanges ont été réalisés ; ils sont décrits dans le tableau 1. Le matériau grossier (gravier) est un ensemble de particules dont le diamètre est supérieur à 5 mm. Les mélanges préparés par Ouangrawa (2007) sont des mélanges de résidus miniers (silt non plastique) et de sable. Dans ce type de mélange, la fraction de particules dont le diamètre est inférieur à 80

µm est considérée comme la fraction fine. Les principales caractéristiques de ces mélanges sont présentées dans le tableau 2.

Des analyses granulométriques par tamisage ont été faites sur ces différents mélanges selon les normes BNQ 2560-040 et par sédimentométrie suivant la norme ASTM D422. Des analyses granulométriques à l'aide d'un granulomètre au laser type Masterizer (Malvern) ont aussi été réalisées pour les mélanges de Ouangrawa (2007). La conductivité hydraulique a été mesurée par des essais au perméamètre à paroi rigide sous charges constantes ou variables et par des essais triaxiaux selon les normes ASTM D-2434 et D 5084-90.

Tableau 1. Caractéristiques des mélanges sable et gravier (Hernandez, 2007).

Mélange	1	2	3	4	5	6
% de sables	100	80	60	40	20	0
% de graviers	0	20	40	60	80	100
Cu [-]	1.63	1.83	2.1	30.52	36	2.67
D ₁₀ (10 ⁻³ cm)	67	71	78	72	100	1500

Tableau 2. Caractéristiques des mélanges de résidus miniers - sable (Ouangrawa, 2007).

Mélange	Lou.	Lou-sig.	Lou-ab	Sig.	Sable
% passant 80 µm	91	52	39	24	0
Cu [-]	10.29	25.72	62.98	23.6	1.32
D ₁₀ (10 ⁻⁴ cm)	2.5	5.2	6.6	12.2	340

3 MODELES DE PREDICTION DE LA POROSITE

Ces modèles permettent de prédire la porosité d'un mélange connaissant la porosité et la granulométrie des fractions qui composent ce mélange.

3.1 Modèle basé sur l'arrangement idéal des particules

Ce modèle est basé sur la typologie des mélanges établie par Clarke (1979). Ce dernier a défini deux types de mélange (ou d'arrangement de particules) pour un mélange binaire. Le mélange idéal grossier est un arrangement (à dominance de grosses particules) dans lequel les petites particules occupent les vides entre les grosses particules. Le mélange idéal fin est un arrangement (à dominance de petites particules) dans lequel les grosses particules sont isolées à l'intérieur des petites particules. Pour ces deux types de mélanges, le volume total est toujours inférieur ou égale à la somme des volumes des deux composantes parce que les fines particules occupent les pores entre les grandes particules.

Reprenant les travaux de Clarke (1979), Koltermann et Gorelick (1995) ont développé un modèle de mélange idéal. Dans ce modèle, le diamètre des particules fines devrait être inférieur à celui des vides entre les grosses

particules. La porosité du mélange n_m est définie selon l'équation (1).

$$n_m = \frac{V_{v-m}}{V_m} = \frac{V_{v-c} - V_{s-f}}{V_m}; \quad [1]$$

avec V_{v-m} : le volume de vide dans le mélange [L3], V_m : volume de mélange [L3], V_{v-c} : volume de vides des grosses particules [L3] et V_{s-f} : volume de solides des particules fines [L3]. L'équation (1) peut aussi s'écrire :

$$n_m = \frac{V_{v-c}}{V_m} - \frac{V_f}{V_m} \left(\frac{V_{s-f}}{V_f} \right); \quad [2]$$

$$\text{où } \frac{V_{s-f}}{V_f} = 1 - n_f, \quad n_c = \frac{V_{v-c}}{V_m} \quad \text{et} \quad r_f = \frac{V_f}{V_m}. \quad [3]$$

Ici n_c [-] et n_f [-] sont respectivement les porosités des matériaux (fractions) grossiers et fins lorsque le volume du mélange (V_m) est égal au volume total du matériau grossier (V_c); r_f [-] est la fraction volumique des particules fines dans le mélange. La porosité du mélange peut aussi être exprimée en fonction des porosités des matériaux grossiers et fins (n_c et n_f) et de la fraction volumique des matériaux fins (r_f).

$$n_m = n_c - r_f(1 - n_f) \quad \text{pour } r_f < n_c; \quad [4]$$

$$n_m = n_c n_f \quad \text{pour } r_f = n_c; \quad [5]$$

$$n_m = r_f n_f \quad \text{pour } r_f > n_c. \quad [6]$$

Rappelons que l'indice de vide du mélange e_m [-] peut s'écrire :

$$e_m = \frac{n_m}{1 - n_m} \quad [7]$$

3.2 Modèle basé sur la théorie des mélanges de particules

A l'échelle macroscopique, l'association des particules de différentes tailles dans un matériau peut être considérée comme un arrangement binaire dans lequel les pores entre les grosses particules sont occupés par les petites

particules. Dans ce cas, le mélange est dit miscible s'il n'y a pas de ségrégation de particules. L'indice des vides dans le matériau peut être prédit à partir de la théorie des mélanges. L'indice des vides du mélange (e_m [-]) est alors défini en fonction de la fraction de matériaux fins (F [-]) dans le mélange selon les indices des vides des grosses et petites particules (respectivement e_c [-] et e_f [-]) par l'équation ci-dessous (Gutierrez, 2003).

$$e_m(F) = e_f F + e_c (1 - F) \quad [8]$$

où e_c [-] est l'indice de vide effectif des grosses particules (en tenant compte de la distribution des petites particules dans les pores du matériau grossier). Cet indice des vides peut être exprimé comme suit :

$$e'_c = e_c - R_m F \quad [9]$$

R_m [-] est un paramètre empirique du mélange. Il traduit le degré de mixité des deux fractions de particules. La valeur théorique varie de 0 (pour les particules non miscibles) à 1 (lorsque que le mélange est dit parfait). En pratique, on a observé que dans certains cas la valeur expérimentale pouvait être supérieure à 1 (Gutierrez, 2003). Selon les équations (8) et (9), on obtient :

$$e_m(F) = e_f F + e_c (1 - F)(1 - R_m F) \quad [10]$$

Notons ici que pour que ces relations s'appliquent, il faut que la même énergie de densification soit utilisée pour tous les mélanges.

4 MODELES DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE SATUREE

Sur la base du modèle de Kozeny -Carman (e.g. Chapuis et Montour, 1992 ; Chapuis et Aubertin, 2003), Aubertin et al. (1996) et Mbonimpa et al. (2000, 2002) ont développé un modèle d'estimation de la conductivité hydraulique saturée. Ce modèle inclus un paramètre de tortuosité qui est fonction de l'indice des vides. L'équation peut s'écrire pour des sols granulaires peu plastiques, en tenant compte des paramètres géotechniques comme suit :

$$k_{sat} = C_g \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_u^{1/3} D_{10}^2 \quad [11]$$

avec C_g constante, γ_w le poids volumique de l'eau [ML^{-3}], μ_w la viscosité de l'eau [$ML^{-1}T^{-1}$], e l'indice des vide [-], x est un facteur qui tient compte de la tortuosité de l'écoulement. En pratique, on utilise $C_g=0.1$, $\gamma_w= 9.81$

kN/m^3 , $\mu_w=10^{-3}$ Pa.s et $x=2$. D_{60} et D_{10} sont respectivement les diamètres (en cm) du tamis correspondant à 60 % et 10 % de particules passantes ; $C_u (=D_{60}/D_{10})$ est le coefficient d'uniformité [-]. Dans le cas des mélanges de particules, l'indice de vide considéré est celui du mélange de particules prédit par la théorie de mélange ou par le modèle de l'arrangement de particules ($e=e_m$). L'équation 11 devient alors

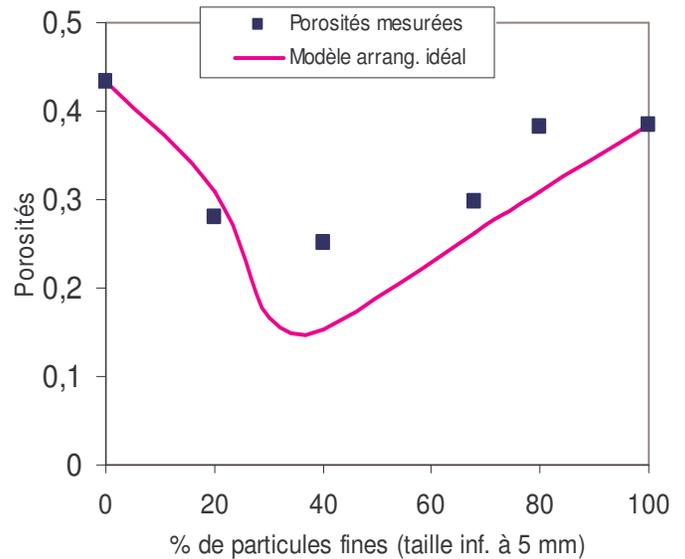
$$k_{sat} (cm / s) = 981 \frac{e^5}{1 + e_m} C_u^{1/3} D_{10}^2 \quad [12]$$

avec C_u et D_{10} du mélange.

5 RESULTATS

5.1 Modèle basé sur la théorie des mélanges de particules

Dans ce qui suit, les valeurs de porosité des mélanges de particules étudiées par Ouangrawa (2007) et Hernandez (2007), prédites par les modèles précités sont comparées aux porosités mesurées.



1a)

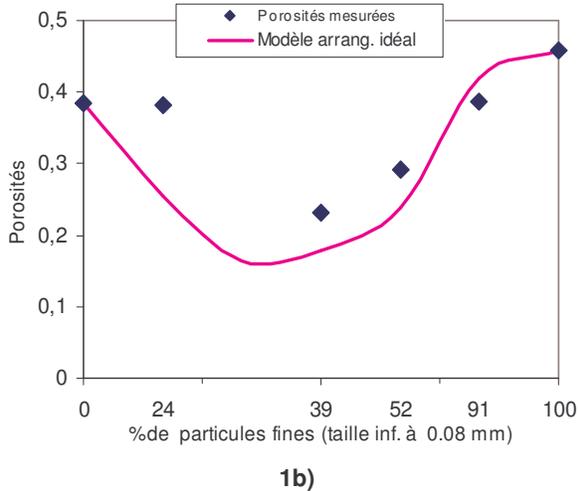


Figure 1 : Comparaison des porosités prédites (équations 4 et 6) en fonction du pourcentage de particules fines et celles mesurées par Hernandez (2007) (a) et Ouangrawa (2007) (b).

La tendance générale de la courbe de la porosité en fonction des pourcentages de particules fines (figure 1) montre deux principales zones :

une première zone correspond à une proportion de 0 à 40 % environ de petites particules. On y observe une baisse de la porosité totale jusqu'à une valeur minimale. Dans cette zone, la porosité du mélange est surtout contrôlée par celle du matériau grossier. Les pores entre les grosses particules sont fermés par les fines particules d'où la diminution de la porosité totale du mélange (Ben et al. 1971 ; Yu et Standish, 1991 ; Vallejo, 2001) ;

une deuxième zone dans laquelle la valeur de la porosité est ascendante pour un pourcentage de particules fines supérieur à environ 40%. La porosité du mélange est alors contrôlée par celle du matériau fin qui, en occupant les pores entre les grosses particules, va progressivement imposer sa porosité.

Au point d'intersection des deux tendances, se trouve la porosité minimale. Cette condition correspond à un état où les petites particules comblent au maximum les vides entre les grosses particules. Le mélange est jugé optimal avec une densité maximale.

On constate à la figure 1 que la tendance est aussi bien observée sur les porosités mesurées que sur les porosités prédites avec le modèle d'arrangement idéal. Ces résultats indiquent que ce modèle peut être utilisé pour estimer la porosité dans ces mélanges. Les écarts observés pourraient être dus à d'autres facteurs (notamment la forme des particules, les effets de mur, l'énergie de compaction, la sphéricité des particules, et le rapport des tailles des particules) qui influencent la porosité, comme l'ont décrits Koltermann et Gorelick (1995), Zou et Yu (1996), Nicodemi et al. (1998), Vallejo (2001), Mota et al. (2003), Kamann et al. (2007), et Chapuis et Aubertin (2008). Certains de ces auteurs ont d'ailleurs développé des approches basées sur ces paramètres physiques afin de tenir compte de ces facteurs.

Les valeurs de l'indice des vides ont aussi été prédites en utilisant le modèle basé sur la théorie des mélanges, suivant différentes valeurs d'indice de mixité R_m . Une valeur de R_m pour laquelle les valeurs d'indices de vides sont proches de celles mesurées a été obtenue. Les indices de vides prédits sont comparés aux valeurs mesurées comme montrés aux les figures 2.a et 2.b.

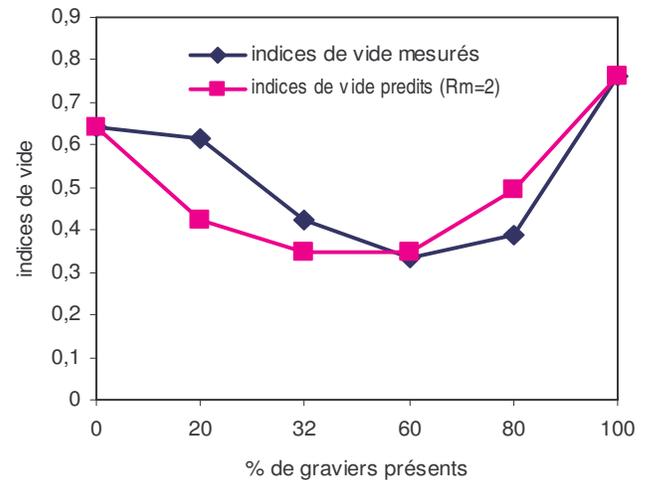
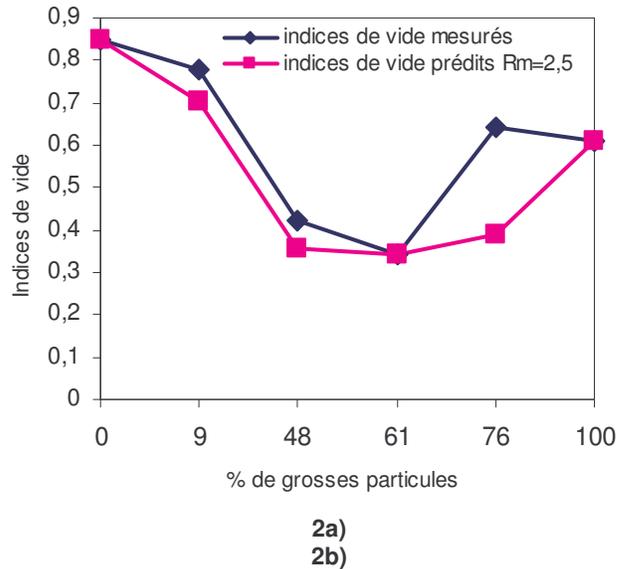


Figure 2. Comparaison des indices de vides prédites en fonction des grosses particules présentes et celles mesurées données de Hernandez (2007) (a) et celles de Ouangrawa (2007) (b).

Dans les deux cas présentés, les indices de vides calculés par la théorie des mélanges en fonction des pourcentages de grosses particules montrent la même tendance que ceux mesurés. Par contre, les indices de mixité diffèrent un peu selon le mélange. Ainsi, pour avoir des valeurs d'indices de vides prédites proches de celles

mesurées, il faut $R_m=2.5$ dans le cas des données de Ouangrawa contre $R_m=2$ dans le cas des données de Hernandez (2007). Ces valeurs sont supérieures à la valeur limite de 1 définie pour les mélanges parfaits étudiés; toutefois d'autres ont aussi obtenues des valeurs supérieures à l'unité avec ce modèle (e.g. Gutierrez, 2003). Cet indice de mixité est un paramètre empirique qui pourrait être lié à des propriétés physiques ; cet aspect demeure à l'étude.

5.2 Estimation de la conductivité hydraulique

A partir des valeurs de porosité (ou d'indices de vides) estimées par le modèle basé sur l'arrangement de particules et celui basé sur la théorie des mélanges, les conductivités hydrauliques saturées peuvent être prédites par le modèle KCM, (équation 11). Les valeurs de conductivités hydrauliques mesurées au laboratoire (courbe 1) sont comparées (figures 3 et 4) à celles prédites par le modèle KCM appliqué directement aux données de porosité mesurée (courbe 2), ou couplé au modèle basé sur l'arrangement idéal des particules (courbe 3, équations 7 et 11) et à celui basé sur la théorie des mélanges (courbe 4, équations 10 et 11).

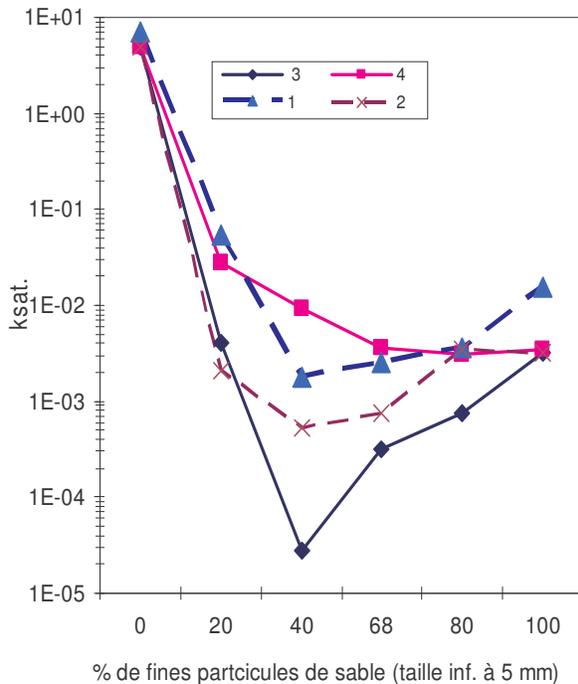


Figure 3. Comparaison des conductivités hydrauliques prédites et mesurées dans le mélange de sable et de gravier (données de Hernandez (2007)).

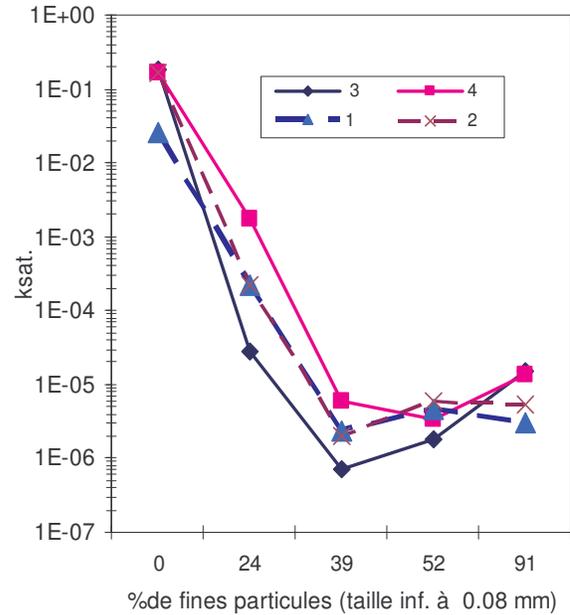


Figure 4. Comparaison des conductivités hydrauliques prédites et mesurées dans un mélange de résidus miniers (données de Ouangrawa (2007)).

Le résultat de cette comparaison des conductivités hydrauliques saturées mesurées et prédites montre que les valeurs estimées de k_{sat} sont usuellement assez proches de celles obtenues au laboratoire. Les écarts les plus significatifs par rapport aux valeurs mesurées sont observés dans le cas des conductivités hydrauliques prédites par le modèle d'arrangement idéal des particules où les valeurs calculées sont toujours inférieures à celles mesurées. Ces résultats rejoignent ceux de certains auteurs qui ont montré que ce modèle ne prend pas bien en compte certains facteurs (telles la forme des particules) qui sont susceptibles d'influencer les propriétés hydriques du mélange (Mc Geary, 1961; Shakoor et Cook, 1990). L'approche du mélange idéal part de l'hypothèse que les particules sont suffisamment petites pour occuper les pores entre les grosses particules. En réalité, lorsque la taille de certaines petites particules se rapprochent de celles des pores entre les grandes particules, le mélange engendre une désorganisation ou une modification de la structure poreuse du matériau. Les petites particules peuvent alors dans certain cas modifier les interconnexions entre les pores. Ceci augmente la conductivité hydraulique saturée. Cette modification n'est pas prise en compte par le modèle d'arrangement idéal. Ce phénomène est important lorsque la taille de diverses particules est proche. Ceci pourrait être le cas des mélanges de Hernandez (2007) (figure 3).

Les conductivités hydrauliques saturées prédites à partir de la théorie de mélange sont plus proches de celles mesurées mais avec des valeurs de coefficient de mixité différentes. Ces valeurs d'indice de mixité sont supérieures à celles attendues dans le cas des mélanges parfaits.

6 CONCLUSION

Les tentatives de prédiction de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} à partir des modèles d'arrangement idéal de particules et de mélange de particules couplés à celui de Kozeny-Carman modifié (KCM) ont donné des résultats intéressants. Les valeurs de conductivité hydraulique saturée prédites sont assez proches des valeurs mesurées. Cependant d'autres facteurs seraient à prendre en compte pour améliorer les prédictions. Ces modèles ont l'avantage de prédire la porosité ou l'indice de vide et la conductivité hydraulique d'un mélange de particules connaissant les propriétés de base des particules qui le compose.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers (www.polymtl.ca/envirogeremi).

REFERENCES

- Aubertin, M. Bussière, B. and Chapuis, R.P. 1996. Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 : 470–482.
- Ben, A.R. Le Goff, P. Le Lec, P. 1971. La perméabilité de milieux poreux formés par empilement de mélanges binaires de grains sphériques, *Powder Technology* 5, 1: 51-60.
- Chapuis, R. et Montour. 1992. Évaluation de l'équation de Kozeny-Carman pour prédire la conductivité hydraulique, Proceedings, 45eme conférence *Canadienne de Géotechnique*, Toronto, Canada, 78-1 – 78-10.
- Chapuis, R.P. et Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 40, n°. 3: 6.
- Chapuis, R.P. et Aubertin, M. 2008. Porosity and permeability in sediment mixtures – Discussion, *Ground water* (à paraître).
- Clarke, R.H. 1979. Reservoir properties of conglomerates and sandstones. *AAPG bulletin* 63, 5:799-809.
- Chen, Q. Nur, A. 1994. Critical concentration models for porous materials, in: *Corapcioglu, Y. (Editor), Advances in porous media, vol. 2, Elsevier*, 4:169-308.
- Finkers, H. G. Hoffmann, A. C. 1998. Ratio for predicting the voidage of binary particle mixtures. *AIChE Journal*, 38: 1097-1104.
- Gutierrez, M. 2003. Mixture theory characterization and modelling of soil mixtures. *Geomechanic*, 3: 600-616.
- Hernandez, M.A. 2007. Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée, *Mémoire Maîtrise Génie Minéral, CGM, École Polytechnique de Montréal*, Québec, Canada, 213 p.
- Jones, M.R. Zheng, L. Newlands, M.D. 2002. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum, *Voids Ratio*, 35:301-309.
- Kamann, J.P. Ritzi, W.R. Dominic, F.D. Conard, M.C. 2007. Porosity and permeability in sediment mixtures, *Ground Water*, 45 (4): 425-435.
- Koltermann, C.E. and Gorelick, S.M. 1995. Fractional packing model for hydraulic conductivity derived from sediment mixtures, *Water Resources Research* 31, 12: 3283-3297.
- Mota, M. Teixeira, J. A. Yelshin, A. Bowen, W. R. 2003. Interference of Coarse and Fine Particles of different shape in mixed Porous beds and filter cakes, *Miner. Eng.*, 16 (2): 135-144.
- Mbonimpa, M. Aubertin, M. Chapuis, R.P. Bussière, B. 2000. Développement de fonctions hydriques utilisant les propriétés géotechniques de base. *1st Joint IAH-CNC-CGS Groundwater Specialty Conf*, pp 343-350.
- Mbonimpa, M. Aubertin, M. Chapuis, R.P. Bussière, B. 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity, *Geotechnical and Geological Engineering*, 20: 235–259.
- McGeary, R.K. 1961. Mechanical packing of spherical particles, *Journal of Ceramic Society* 44, 10:513-522.
- Nicodemi, M. 1998. A phenomenological theory of dynamic processes in granular Media, *Physica A*, 257: 448-453.
- Ouangrawa, M. 2007. Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-geochimique des résidus minier sulfureux partiellement submergés, *Thèse Doctorat - Génie minérale, CGM, École Polytechnique de Montréal*, Québec, Canada.
- Shakoor, A. and Cook, B.D. 1990. The effect of stone content, size, and shape on engineering properties of compacted silt clay, *Bulletin of Association of Engineering Geology* 27, 2: 245-253.
- Tieje, O. and Hennings, V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes, *Geoderma*, 69:71-84.
- Vallejo, E.L. 2001. Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 616–628.
- Yu, A.B. Standish, N. 1991. Estimation of the porosity of particle Mixtures by a linear-mixture packing model, *Ind. Eng. Chem. Res.* 30, 6:1372-1385.
- Yu A.B., Zou, Z.P. Standish N. 1996. Modifying the linear packing model for predicting the porosity of nonspherical particle mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35: 3730-3741.
- Zou R.P., Yu A.B. 1996. Evaluation of the packing characteristics of monosized non-spherical particles, *Powder Technol.* 88: 71–79.