

RELATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES HYDROMÉCANIQUES ET LA RÉSISTANCE À L'ÉROSION INTERNE D'UN SOL FIN TRAITÉ

RELATIONSHIPS BETWEEN THE HYDRO-MECHANICAL CHARACTERISTICS AND THE INTERNAL EROSION RESISTANCE OF A TREATED SOIL

Abdelwadoud MEHENNI^{1, 2}, Olivier CUISINIER², Farimah MASROURI², Emmanuel LAVALLEE¹

¹ Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

² LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, Nancy, France

RÉSUMÉ – Cette étude met en évidence les améliorations des caractéristiques hydromécaniques et de la résistance à l'érosion interne d'un sol fin par l'ajout d'un produit de traitement. Selon chaque produit, ces améliorations se traduisent soit par une baisse de la conductivité hydraulique et/ou une augmentation de la résistance mécanique, et/ou une augmentation de la résistance à l'érosion interne. Les résultats montrent que les différents produits de traitement permettent d'ajuster les caractéristiques des sols fins.

ABSTRACT – This study presents the improvements of hydro-mechanical and internal erosion resistance characteristics of fine graded soils by addition of a treatment product. Depending on the product type, the treatments resulted either in a decrease of the hydraulic conductivity and/or an increase of mechanical strength, and/or an increase of the internal erosion resistance. The results showed that the treatment products improved the hydro-mechanical characteristics of fine soils.

1. Introduction

Les sols employés pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques doivent répondre à un certain niveau de performances hydrique, mécanique et d'érodabilité. Cependant, souvent les sols disponibles dans l'emprise des ouvrages ne répondent pas aux critères techniques requis. Le traitement des sols peut alors être utilisé pour faciliter la mise en œuvre des matériaux très humides et pour améliorer les performances mécaniques et/ou hydriques des sols. Toutefois, l'utilisation des sols traités dans les ouvrages hydrauliques soulève d'autres questions. En effet, en plus d'assurer leur stabilité globale et leur fonction hydraulique, ces ouvrages doivent faire face aux différents mécanismes d'érosion et notamment les mécanismes d'érosion interne.

Afin de caractériser l'érosion des sols, et notamment l'érosion interne qui se développe dans un conduit, Wan et Fell (2002) ont mis en place le Hole Erosion Test (HET) qui permet de déterminer la loi d'érosion d'un sol sous la forme suivante :

$$\dot{\varepsilon} = k_{er}(\tau - \tau_c) \quad (1)$$

où : $\dot{\varepsilon}$ est le taux d'érosion par unité de surface et par unité de temps (kg/s/m^2) ; τ_c est la contrainte de cisaillement hydraulique (Pa) ; k_{er} est le coefficient d'érosion du sol (s/m) ; τ_c est la contrainte critique du sol (Pa).

Les deux paramètres d'érosion k_{er} et τ_c caractérisent l'érodabilité d'un sol et sont influencés par plusieurs facteurs. Plusieurs études traitent de l'influence des conditions de compactage des sols sur ces deux paramètres (e.g., Wan et Fell, 2002 ; Whal, 2010 ; Benahmed et Bonelli, 2012 ; Bennabi et al., 2012 ; Haghghi, 2012). Ces études montrent notamment que l'augmentation de la densité sèche initiale induit une diminution du

coefficient d'érosion ainsi qu'une augmentation de la contrainte critique. Cependant, rares sont les études qui traitent de l'évolution des deux caractéristiques d'érosion des sols après l'ajout d'un produit de traitement type chaux et ciment (e.g., Indraratna et al. 2009 ; Chevalier et al. 2012 ; Herrier et al. 2015). Ces études montrent que le traitement à la chaux/ciment permet d'augmenter la contrainte critique et de diminuer le coefficient d'érosion des sols. Cependant, le nombre très limité de ces études ne permet pas de bien mettre en évidence le rôle du dosage et du temps de cure sur l'ampleur des modifications des caractéristiques d'érosion par traitement. Ce manque de données est principalement lié aux limites des dispositifs actuellement disponibles qui ne permettent pas d'appliquer des contraintes de cisaillement hydraulique assez élevées pour provoquer l'initiation du processus d'érosion dans les sols traités.

Cet article vise à quantifier l'impact de différents traitements sur les caractéristiques hydrique, mécanique et en particulier la résistance à l'érosion interne d'un limon fin. Les relations existantes entre les différentes caractéristiques ont aussi été mises en évidence.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Sol et produits de traitement

L'étude a été réalisée sur un limon fin du Bassin Parisien [classe GTR : A1 ; $w_L = 28,5\%$; $w_P = 20,5\%$; $VBS = 1,56$; pourcentage ($< 80\ \mu\text{m}$) = $99,2\%$]. Les produits de traitement et les dosages utilisés sont les suivants : une kaolinite (2, 5 et 9 %), une bentonite calcique activée (2, 5 et 9 %), une chaux vive (1 et 3 %) et un ciment CEM II (3 et 6 %).

2.2. Modalités de traitement et de compactage

Pour la confection des mélanges sol-produits de traitement, le sol a été préparé à la teneur en eau souhaitée, puis conservé durant 24 heures pour homogénéisation. Ensuite, le produit de traitement correspondant a été mélangé avec le sol par un malaxage mécanique. Le sol traité à la chaux a été conservé pendant 1 heure dans des sacs hermétiques avant compactage. Le sol traité au ciment a été compacté directement après malaxage. Pour le sol traité par produits argileux, aucun temps d'attente n'a été nécessaire entre le malaxage et le compactage. Par la suite, les courbes de compactage Proctor ont été déterminées pour chaque traitement et chaque dosage étudié.

Les éprouvettes destinées aux essais hydrique et mécanique, de taille $D = 35\ \text{mm}$, $H = 70\ \text{mm}$, ont été compactées statiquement par double pistonnage. Pour les éprouvettes destinées à des essais *HET*, le sol a été compacté directement dans la cellule d'essai ($D = 70\ \text{mm}$, $H = 150\ \text{mm}$) par compactage statique. Toutes les éprouvettes ont été compactées du côté humide de l'optimum avec : $w = w_{OPN+2,5\%}$ et $0,96 \rho_{dmax} < \rho < 0,97 \rho_{dmax}$. L'optimum étant déterminé selon chaque modalité de traitement.

Par ailleurs, différents temps de cure (1, 7, 30 et 90 jours) ont été testés dans le cas du traitement à la chaux et au ciment.

2.3. Programme expérimental

La caractérisation du comportement hydromécanique et de la résistance à l'érosion interne se base sur trois essais :

- la résistance à la compression simple (R_c) : les essais ont été réalisés avec une vitesse de déplacement constante de $1,05\ \text{mm/min}$. Pour chaque modalité de traitement, l'essai a été réalisé sur trois éprouvettes et la moyenne a été prise en considération ;

- la *conductivité hydraulique à l'état saturé* (k) : des perméamètres à paroi flexible (cellules triaxiales), combinés à des contrôleurs pression volume ont été utilisés, la conductivité hydraulique a été mesurée après saturation des éprouvettes ;
- la *résistance à l'érosion interne* par dispositif type HET (k_{er} et τ_c) dont les détails sont donnés dans la section suivante.

3. Dispositif d'érosion interne HET optimisé

Le principe de l'essai HET consiste à établir un écoulement d'eau dans un conduit cylindrique préformé initialement dans l'éprouvette de sol. Les contraintes de cisaillement hydraulique générées à l'interface sol/eau provoquent alors l'érosion du sol dans le conduit. Le processus d'érosion du sol est déterminé à travers le suivi de l'évolution du diamètre du conduit en fonction du temps.

3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif HET développé dans le cadre de ce travail a été conçu spécifiquement pour la détermination du processus d'érosion des sols traités sous hautes contraintes de cisaillement hydraulique (Figure 1). Ce dispositif comporte plusieurs nouvelles améliorations qui concernent principalement : *i*) le système l'application de pression à l'entrée de la cellule (avec une pression maximale de 670 kPa). Cette pression est appliquée par un réservoir à membrane air-eau, le maintien du niveau de pression se fait par le réglage automatique de la vanne de régulation d'entrée d'air dans le réservoir. *ii*) La cellule d'essai qui a été conçue de manière à maintenir l'éprouvette de sol intacte même sous hautes contraintes hydrauliques.

Le dispositif comporte aussi d'autres composantes, à savoir : *i*) des capteurs de pression placés dans la chambre d'entrée et dans la chambre de sortie permettant la mesure du différentiel de pression (ΔP) entre l'amont et l'aval de la cellule, *ii*) un débitmètre à ultrasons placé en amont de la cellule d'essai, *iii*) un turbidimètre connecté à la chambre de sortie et permettant la détermination de la concentration des particules de sol dans les effluents. Le dispositif et la méthode d'analyse sont décrits en détail dans Mehenni (2015) et Mehenni et al. (2016).

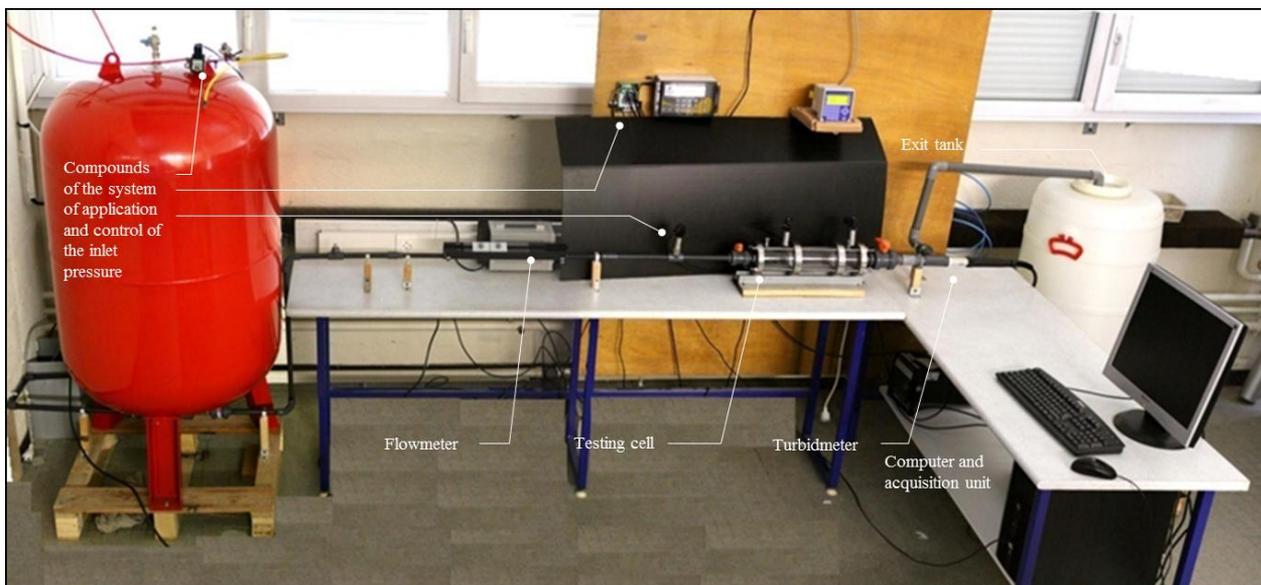


Figure 1. Dispositif HET développé spécifiquement pour la caractérisation de l'érosion interne des sols traités.

3.2. Procédure d'essai

Après le compactage du sol, le conduit initial est réalisé par forage, avec un diamètre variant entre 3 et 6 mm. L'éprouvette du sol est ensuite placée dans la cellule d'essai. L'essai d'érosion est réalisé par application d'une pression constante à l'entrée de la cellule d'essai. L'objectif étant de maintenir cette pression à un niveau stable pendant l'essai et de mesurer pour chaque pas de temps le débit d'eau traversant le conduit, le différentiel de pression entre l'amont et l'aval, et aussi la turbidité des effluents. À la fin de l'essai, le conduit érodé est rempli avec de la paraffine liquide afin de déterminer la géométrie et le diamètre final moyen.

3.3. Modèle d'analyse

Pour établir la loi d'érosion d'un sol (équation 1), il est nécessaire de calculer la valeur de $\dot{\varepsilon}$ et de τ_c tout au long du processus d'érosion. Avec les hypothèses considérées par Wan et Fell (2002), les deux paramètres se calculent comme suit :

$$\dot{\varepsilon} = \rho_d \cdot dr(t) / dt \quad (2)$$

$$\tau_c = \Delta P / (2 \cdot L \cdot r(t)) \quad (3)$$

Où : $dr(t)$ est la variation du rayon $r(t)$ durant un intervalle de temps t .

Les équations 2 and 3 montrent que la détermination de la loi d'érosion passe par la détermination du rayon du conduit tout au long du processus d'érosion. Pour cela, la méthode du signal de turbidité a été utilisée (e.g., Reddi et al. 2000 ; Benahmed et Bonelli 2007 ; Haghghi 2012).

4. Impact du traitement sur le comportement hydrique et mécanique du sol

Avec un compactage du côté humide de l'optimum, le limon sans traitement présente une résistance à la compression R_c de 142 kPa et une conductivité hydraulique k de $6,0 \times 10^{-09}$ m/s. ces deux valeurs constituent les valeurs références de l'étude.

L'ajout de la kaolinite ou de la bentonite n'a pas modifié de manière significative la R_c du limon (Tableau 1). L'ensemble des éprouvettes compactées du côté humide de l'optimum présente une R_c variant entre 142 et 186 kPa. L'ajout de 2 et 5 % de kaolinite permet de réduire k à $2,3 \times 10^{-09}$ et $1,3 \times 10^{-09}$ m/s respectivement. L'utilisation d'un dosage plus élevé en kaolinite (9 %) induit une réduction encore plus importante de k qui atteint une valeur de $7,3 \times 10^{-10}$ m/s (Tableau 1). L'ajout de la bentonite engendre une réduction significative de k , l'ampleur de cette réduction est plus importante avec des dosages élevés en bentonite (Tableau 1).

L'ajout de la chaux engendre une augmentation de R_c qui atteint, sans période de cure, 200 et 250 kPa respectivement pour 1 et 3 % de chaux. Après une période de cure de 90 jours, R_c atteint 300 kPa pour 1 % de chaux et une valeur de l'ordre de 500 kPa pour 3 % de chaux. Par rapport au sol naturel, R_c a augmenté avec un ratio de 2 et 3,5 respectivement pour 1 et 3 % de chaux. L'ajout de 1 % chaux n'a pas modifié de manière significative k qui atteint une valeur de $9,0 \times 10^{-09}$ m/s après 90 jours de cure. Avec un dosage de 3 % de chaux, k du limon diminue légèrement et atteint une valeur de $9,7 \times 10^{-10}$ m/s après 90 jours de cure. De plus, k reste stable sur la période de cure variant entre 0 et 90 jours de cure.

L'ajout du ciment engendre une augmentation de R_c qui atteint, après 90 jours de cure, des valeurs de l'ordre de 800 et 1500 kPa respectivement pour 3 et 6 % de ciment. Par

rapport au sol naturel, R_c a augmenté avec un ratio de 5,5 et 10,9 respectivement pour 3 et 6 % de ciment. Avec un dosage de 3 % de ciment, k du limon diminue légèrement et atteint une valeur de $1,9 \times 10^{-09}$ m/s après 90 jours de cure. Avec un dosage de 6 % de ciment, k diminue d'un ordre de grandeur par rapport à k du limon sans traitement. k reste stable sur la période de cure variant entre 0 et 90 jours de cure pour les deux dosages étudiés.

Tableau 1. Impact du traitement sur la conductivité hydraulique (k) du limon.

Nature de traitement	Notation	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)	k (m/s)	R_c (kPa)
Limon naturel	S	1,73	17,5	$6,0 \times 10^{-09}$	142
+ 1 % chaux	SL 1%	1,70	20,0	$9,0 \times 10^{-09}$	331 (90 j)
+ 3 % chaux	SL 3%	1,68	20,0	$9,7 \times 10^{-10}$	485 (90 j)
+ 3 % ciment	SC 3%	1,75	17,5	$1,9 \times 10^{-09}$	818 (90 j)
+ 6 % ciment	SC 6%	1,75	17,5	$7,3 \times 10^{-10}$	1554 (90 j)
+ 2 % bentonite	SB 2%	1,74	17,8	$2,2 \times 10^{-10}$	155
+ 5 % bentonite	SB 5%	1,74	18,8	$5,1 \times 10^{-11}$	175
+ 9 % bentonite	SB 9%	1,68	20,0	$2,6 \times 10^{-11}$	142
+ 2 % kaolinite	SK 2%	1,73	18,0	$2,3 \times 10^{-09}$	186
+ 5 % kaolinite	SK 5%	1,75	17,5	$1,3 \times 10^{-09}$	186
+ 9 % kaolinite	SK 9%	1,74	18,3	$7,3 \times 10^{-10}$	170

5. Impact du traitement sur la résistance à l'érosion

Les caractéristiques d'érosion (k_{er} , τ_c) du limon avec et sans traitement sont présentées dans la Figure 2. Les principaux résultats sont synthétisés dans cette partie.

5.1. Limon sans traitement

Plusieurs essais ont été réalisés sur des éprouvettes compactées dans les mêmes conditions, et seules les éprouvettes dont le conduit final est érodé de manière uniforme ont été analysées. Le limon sans traitement présente un τ_c variant entre 291 et 615 Pa, et un k_{er} variant entre $1,13 \times 10^{-4}$ et $3,04 \times 10^{-4}$ s/m. Les valeurs moyennes retenues comme références sont : $\tau_c = 429$ Pa et $k_{er} = 2,0 \times 10^{-4}$ s/m. Les résultats montrent que le dispositif assure une bonne répétabilité des essais, les rapports de variation des deux caractéristiques mesurées sont similaires aux rapports usuellement obtenues à partir d'essai HET (e.g., Wan et Fell 2002, Haghghi 2012).

5.2. Traitement par produits argileux

Le traitement avec un dosage de 2 % de kaolinite engendre une légère augmentation de τ_c avec une valeur moyenne de 607 Pa, k_{er} n'a pas été modifié de manière significative. Pour un dosage de 9 % de kaolinite, τ_c n'a pas été modifié de manière significative, cependant, k_{er} a diminué d'un ordre de grandeur par rapport à k_{er} du limon non traité.

L'ajout de la bentonite induit une légère diminution de τ_c , mais qui reste toutefois dans l'intervalle de variation de τ_c du limon sans traitement avec une valeur moyenne de 316 et

294 Pa pour 2 et 9 % de bentonite respectivement. Avec l'ajout de la bentonite, k_{er} a diminué d'un ordre de grandeur pour les deux dosages de bentonite.

5.3. Traitement à la chaux

Avec un traitement par 1 % de chaux, k_{er} varie entre $1,09 \times 10^{-4}$ et $2,87 \times 10^{-4}$ s/m indépendamment de la période de cure. τ_c augmente après traitement à 1 % de chaux avec des valeurs variant entre 963 et 1538 Pa après 30 jours de cure. Avec un traitement par 3 % de chaux, k_{er} varie entre $1,54 \times 10^{-4}$ et $4,52 \times 10^{-4}$ s/m indépendamment de la période de cure. Cependant, τ_c augmente après traitement à 3 % de chaux avec des valeurs variant entre 1035 et 1845 après 30 jours de cure. Le temps de cure ne semble pas affecter l'évolution de k_{er} . Cependant, τ_c tend à augmenter avec l'augmentation du temps de cure.

5.3. Traitement au ciment

Le traitement à 3 % de ciment, ne modifie pas de manière significative k_{er} . Cependant, τ_c augmente avec une valeur moyenne de l'ordre 2900 Pa indépendamment du temps de cure. Avec un dosage plus élevé en ciment (6 %) τ_c augmente de manière encore plus importante est atteinte une valeur de l'ordre de 9800 kPa après 7 jours de cure seulement. De plus, avec un dosage de 6 % de ciment k_{er} est diminué d'un ordre de grandeur.

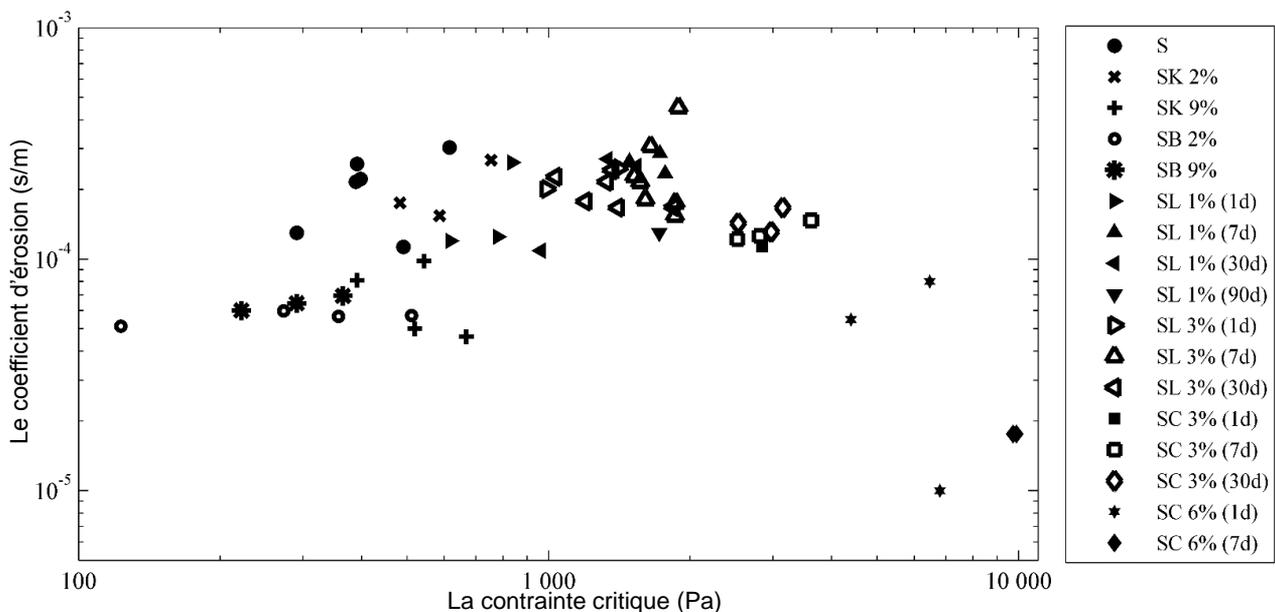


Figure 2. Impact du traitement sur les caractéristiques d'érosion du limon.

7. Relation entre les caractéristiques hydromécaniques et l'érosion interne

L'évolution de τ_c en fonction de R_c est illustrée dans la Figure 3.a. Les valeurs maximales de τ_c sont obtenues pour les valeurs les plus élevées de R_c . De plus, l'augmentation de R_c s'accompagne d'une augmentation de τ_c . Cette tendance peut être expliquée par les liens cimentaires qui se créent dans le sol traité et qui confèrent au sol une meilleure résistance mécanique, et aussi une meilleure résistance à l'arrachement lors du processus d'érosion. Les résultats montrent que la relation entre τ_c et R_c peut être définie

par des domaines de variations par paliers pour les deux paramètres comme illustré dans le Figure 3.a. Ces domaines permettent de donner une idée sur l'ordre de grandeur de τ_c à partir des résultats des essais R_c . Ces résultats peuvent être utilisés sur des sols limoneux similaires au sol étudié comme un premier indicateur du niveau de la contrainte critique avant la réalisation des essais d'érosion qui nécessitent des moyens techniques adaptés et des délais plus long.

La Figure 3.b montre l'évolution de k_{er} en fonction de k . Globalement, les valeurs du coefficient d'érosion peuvent être séparées en deux zones. Une zone où le coefficient d'érosion est supérieur à 1×10^{-4} s/m et avec des valeurs de k globalement supérieures à 1×10^{-9} m/s. Une seconde zone où k_{er} est inférieur à 1×10^{-4} s/m et avec des valeurs de k inférieures à 1×10^{-9} m/s. La corrélation entre ces deux paramètres est faible, mais une tendance d'augmentation du k_{er} est observée avec l'augmentation de k .

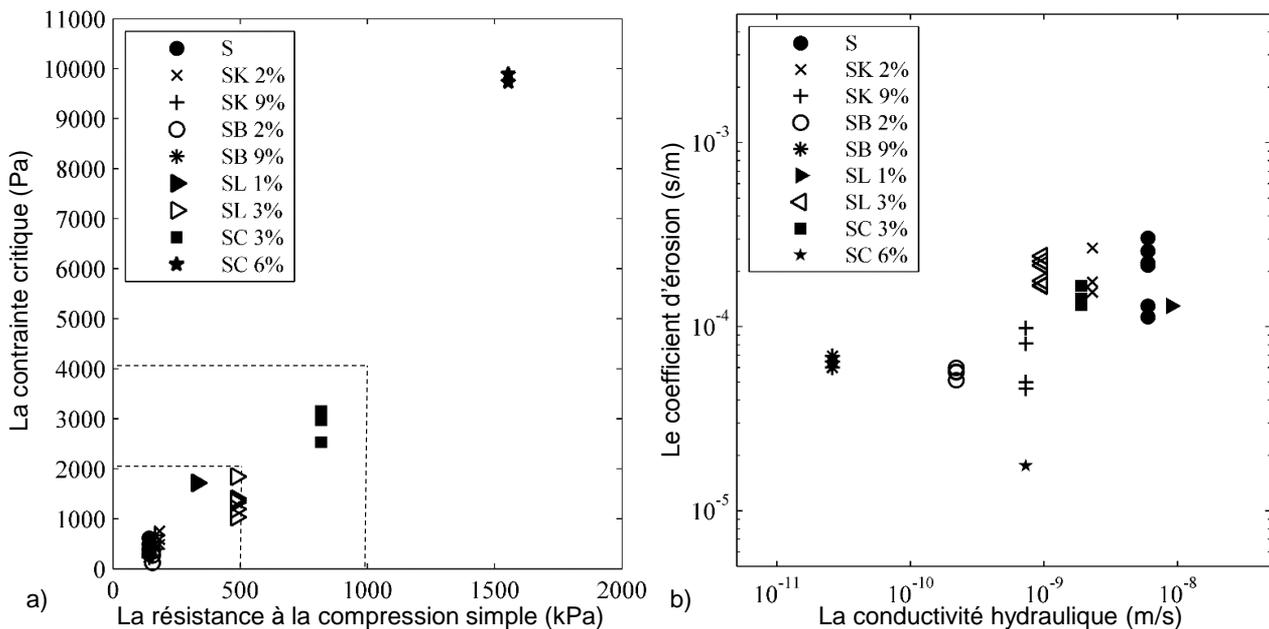


Figure 3. Relations entre les caractéristiques hydromécaniques et d'érosion interne.

a) Relation entre τ_c et R_c . b) Relation entre k_{er} et k .

8. Conclusion

Le principal objectif de cette étude a été de déterminer l'impact du traitement sur les caractéristiques hydromécaniques et la résistance à l'érosion interne d'un sol fin. Un dispositif d'érosion type HET a été développé spécifiquement pour la quantification de l'évolution des caractéristiques d'érosion après traitement. Le nouveau dispositif permet ainsi de réaliser des essais d'érosion interne soumis à des pressions pouvant atteindre 670 kPa. Les résultats de cette étude ont permis de présenter les conclusions suivantes :

- l'ajout d'un produit argileux permet de diminuer la conductivité hydraulique et aussi le taux d'érosion des particules de sol. L'ampleur de ces effets est liée à la nature et au dosage de l'argile utilisée ;
- l'ajout de la chaux permet d'augmenter la résistance mécanique du sol et aussi la contrainte critique du sol. De plus, la maîtrise des conditions de compactage permet de maintenir, voire de diminuer, la conductivité hydraulique du sol après traitement ;

- le traitement au ciment permet d'augmenter la résistance mécanique et aussi la résistance à l'érosion des sols et aussi de maintenir, voire de diminuer en fonction du dosage, la conductivité hydraulique du sol après traitement.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail montrent que la technique du traitement des sols, utilisée couramment dans le domaine des projets linéaires, peut être envisagée lors de la réalisation d'ouvrages hydrauliques. En effet, cette technique permet de :

- diminuer ou de supprimer des matériaux d'apport par la valorisation maximale des matériaux du site avec un traitement adapté ;
- remplacer les dispositifs d'imperméabilisation (géomembranes, ouvrages en béton, ...) par la constitution de barrières peu perméables en sol traité ;
- gagner en sécurité à l'érosion interne et d'optimiser la stabilité globale de l'ouvrage moyennant les améliorations des propriétés des sols par traitement.

9. Références bibliographiques

- Benahmed N., Bonelli S. (2012). Investigation concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, N° 1, January, 43-58.
- Bennabi A., Karoui T., Benamar A., Wang H.Q. (2012). Some elements of comparison between two laboratory devices for soil erosion testing, *ICSE6 Paris-august 27-31*, 1089-1096.
- Chevalier C., Haghghi I., Herrier G. (2012). Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory, *ICSE6 Paris-august 27-31*, 1065-1072.
- Haghghi I. (2012). Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion des sols : développement d'essais et applications pratiques. *Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France*.
- Herrier G., Puiatti D., Bonelli S., Fry J.J., Nerinx N., Froumentin, M. 2015. Le traitement des sols à la chaux : une technique innovante pour la construction des ouvrages hydrauliques en terre. *ICOLD 25th Congress: 1-21. Stavanger*.
- Indraratna B., Muttuvel T., Khabbaz H. (2009). Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics, *Canadian Geotechnical journal*, N° 46, 57-68.
- Mehenni A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. *Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France*.
- Mehenni A., Cuisiner O., Masroui F. (2016). Impact of lime, cement and clay treatments on the erodibility of soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, in press.
- Reddi L.N., Lee I.M., Bonala M.V.S. (2000). Comparison of internal and surface erosion using flow pump tests on a sand-kaolin mixture, *Geotechnical testing journal*. N° 23, 116-122.
- Wahl T. (2010). A comparison of the hole erosion test and jet erosion test, *Joint federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling, Las Vegas june 27-july 1*.
- Wan C.F., Fell R. (2002). Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test, *UNICIV Report*, no. R-412.