

# INFLUENCE DE LA COMPOSITION DE LA BOUE ET DU PH DU FLUIDE SUR LE COEFFICIENT DE PERMÉABILITE ÉLECTRO-OSMOTIQUE

## *INFLUENCE OF SLUDGE COMPOSITION AND PH OF THE FLUID ON THE ELECTROOSMOTIC PERMEABILITY COEFFICIENT*

Banambono Wilfried FOROGO <sup>1,2</sup>, Guillaume STOLTZ <sup>1</sup>, Nathalie TOUZE <sup>3</sup>, Stéphane BONELLI <sup>1</sup>

*1 Irstea, Aix-en-Provence, France*

*2 AFITEX, Champhol, France*

*3 Irstea, Antony, France*

**RÉSUMÉ** – En France 13 Mm<sup>3</sup> de sédiments sont dragués par an. Ces sédiments peuvent être pollués et, dans ce cas, nécessitent une mise en installation de stockage de déchets (non dangereux). Le projet VALSSINNOV ambitionne de dépolluer et d'essorer les sédiments dans des bassins munis de géocomposites fonctionnalisés par l'électrocinétique (application d'un champ électrique dans un milieu poreux). Dans cet article nous étudierons expérimentalement l'influence de la composition des sédiments et du pH sur le coefficient de perméabilité électroosmotique. Le coefficient de perméabilité électroosmotique est toujours du même ordre de grandeur de 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/(sV) quelle que soit la composition de la boue et quel que soit le pH de la solution utilisée.

Mots-clés : sédiments dragués, électrocinétique, géocomposite, électroosmose, dépollution

**ABSTRACT** – In France 13 Mm<sup>3</sup> of sediments are dredged each year. These sediments can be polluted and, in this case, require installation in waste storage facility (non-hazardous). The VALSSINNOV project aims to depollute and dewater sediments in basins equipped with geocomposites functionalized by electrokinetic (application of an electric field in a porous medium). In this paper, we will experimentally study the influence of sediment composition and pH on the electroosmotic permeability coefficient. The electroosmotic permeability coefficient is always of the same order of magnitude of 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/(sV) whatever the composition of the sludge and whatever the pH of the solution used.

Keywords: dredged sediments, electrokinetic, geocomposite, electroosmosis, depollution

## 1. Introduction

En France 13 Mm<sup>3</sup> de sédiments sont dragués par an. Les sédiments extraits des cours d'eau sont considérés comme des déchets par la réglementation. Alors ils doivent être traités et stockés comme tels c'est-à-dire être admis en Installation de Stockage de Déchets Non-Dangereux (ISDND). Cela augmente les coûts de traitement des sédiments et demande plus d'espace pour le stockage. En plus d'être considérée comme un déchet, une grande partie (environ 40% sur toute la France (selon Delcour et Hebrard (2012) des sédiments extraits est considérée comme un déchet non-inerte et non dangereux c'est-à-dire qu'elle contient des polluants à un pourcentage supérieur à celui autorisé par la réglementation. En effet, si nous prenons la région Nord-Pas-De-Calais qui est la zone géographique de notre étude, environ 60% des sédiments extraits dans cette région sont non-inertes (Delcour et Hebrard, 2012). En plus d'être non-inertes, les sédiments issus du Nord-Pas-de-Calais contiennent une proportion variable d'argile (particules dont la taille est inférieure à 2 µm) qui va de 16% à 38%. Ces argiles font partie des particules fines qui contiennent la majorité des polluants des sédiments (Alary et al., 2011 ; Nguyen, 2008 ; Scordia, 2008 ; Solène, 2013). Avec toutes ces contraintes pour le traitement et le stockage des déchets, les gestionnaires de voies navigables font face à des problèmes d'ordre économique, au regard des conditions de stockage contraignantes, ce qui augmente le coût de stockage, et d'ordre foncier car les quantités de sédiments sont grandes et nécessitent de plus en plus de terrain pour leur stockage. Pour éviter cette mise en ISDND, le projet VALSSINNOV ambitionne de développer un traitement des sédiments pour les dépolluer afin de les rendre inertes. Le traitement se fera par l'intermédiaire de bassins munis de géocomposites de drainage innovants. Les géocomposites de drainage sont utilisés pour le stockage passif des sédiments dragués. Les géocomposites innovants seront fonctionnalisés afin de leur incorporer les fonctions actives de dépollution et d'essorage. Cette fonctionnalisation se fera par l'incorporation de l'électrocinétique dans les géocomposites à travers l'ajout d'électrodes dans leur structure. Dans la première partie de cette communication, le projet VALSSINNOV

sera présenté. Dans la deuxième partie, les géocomposites innovants et leurs fonctions seront développés. Dans la troisième partie l'électrocinétique sera présentée et dans la dernière partie, une étude expérimentale sur l'évaluation de l'applicabilité de l'électrocinétique sera présentée, n'incluant pas à ce stade de l'étude l'utilisation des géocomposites mais seulement le principe de l'électrocinétique.

## 2. Le projet VALSSINNOV

Le projet VALSSINNOV ambitionne de rendre valorisables les sédiments non dangereux, non inertes, considérés actuellement comme des déchets difficilement valorisables. Pour ce faire, l'essentiel des polluants contenus dans les sédiments devra être éliminé pour rendre les sédiments inertes et n'impactant donc plus ni l'environnement ni la santé. L'élaboration de cette méthode sera associée au développement d'un géosynthétique polyvalent et actif combinant des fonctions de filtration, de drainage et de dépollution pour valoriser les sédiments. Pour atteindre ces objectifs, le projet réunit des spécialistes de l'ingénierie environnementale (ANTEA Group, chef de file), des matériaux géosynthétiques (Afitex, le laboratoire Géosynthétiques de l'unité RECOVER d'Irstea Aix-en-Provence), de la gestion des sédiments (Voies Navigables de France) et des travaux publics et du génie civil (Vinci Construction Terrassement). Ce traitement se fera dans des bassins tapissés de géocomposites innovants comme sur la Figure 1.

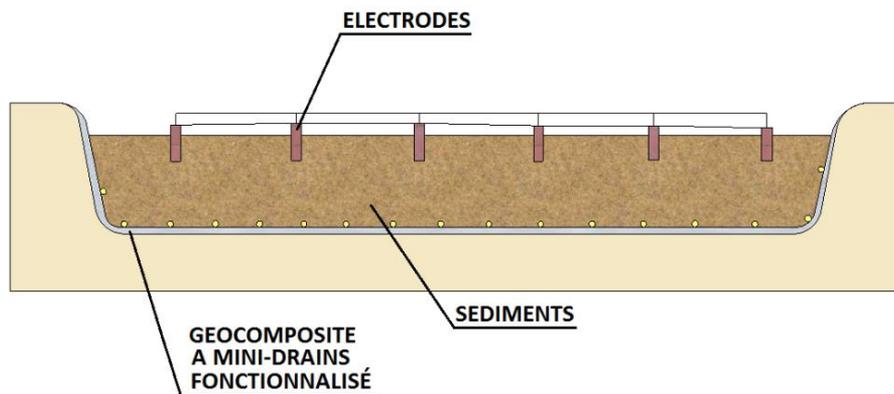


Figure 1. Représentation schématique d'un bassin de traitement

## 3. Les géocomposites innovants

Les géocomposites innovants seront des géocomposites de drainage. Ces géocomposites de drainage sont dotés de fonctions intrinsèques qui sont les suivantes :

- la filtration est la rétention du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un matériau géosynthétique (AFNOR, 2015). Dans le géocomposite, la fonction filtration est assurée par un géotextile filtre. L'adéquation des géotextiles filtre pour la filtration des matériaux constitués majoritairement de particules fines a été démontrée par Bourgès-Gastaud et al. (2014). Le géotextile filtre n'agit que dans les premiers instants de la filtration afin de permettre la formation du « filter cake » qui assure par la suite le rôle de filtre ;
- le drainage est le fait de collecter et de transporter des eaux pluviales, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géosynthétique (AFNOR, 2015). La fonction de drainage est assurée par une âme drainante non tissée aiguilletée et des mini-drains.

En plus de ces fonctions passives, les géocomposites seront fonctionnalisés afin de leur incorporer des fonctions actives de dépollution et d'essorage. Pour ce faire, des électrodes sont ajoutées aux géocomposites (Figure 2).

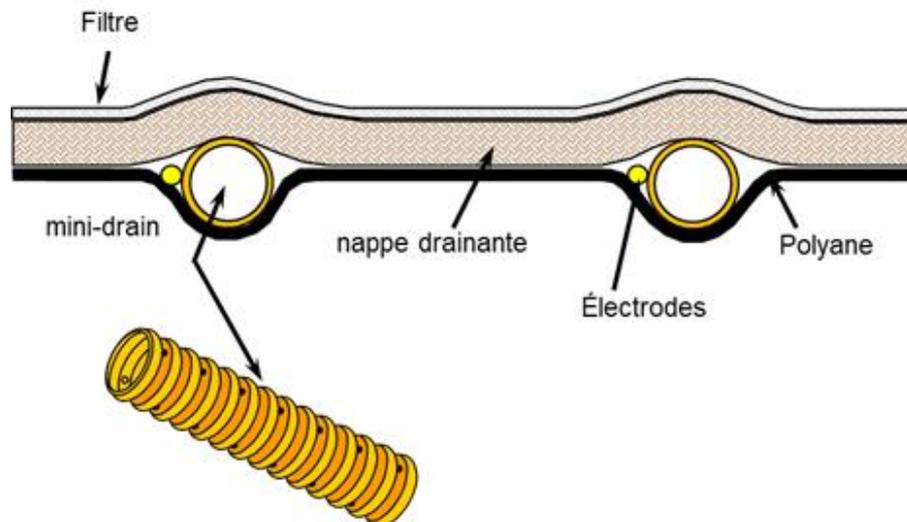


Figure 2. Géocomposite de drainage fonctionnalisé

Cette fonctionnalisation se fera à travers la technologie de l'électrocinétique. L'électrocinétique est l'application d'une différence de potentiel électrique ou une densité de courant dans un milieu poreux.

#### 4. Electrocinétique et étude expérimentale

L'application d'une différence de potentiel électrique ou d'un courant électrique dans un milieu poreux humide entraîne le développement de phénomènes électrocinétiques (Glendinning et al., 2005). Les phénomènes électrocinétiques qui interviennent dans le traitement des sédiments sont :

- l'électro-osmose, qui est un écoulement de fluide dans la matrice de particules chargées du sol qui apparaît lors de l'application d'une différence de potentiel électrique. L'application d'une différence de potentiel électrique dans un milieu poreux provoque l'apparition d'un débit électro-osmotique dû aux déplacements des charges liées à la surface des particules. Le coefficient de perméabilité électroosmotique est un paramètre important dans l'essorage actif des sédiments par électro-osmose, car il permet de calculer le débit que l'on peut extraire par électro-osmose. La relation entre le débit électro-osmotique et le coefficient de perméabilité électro-osmotique est présentée dans l'équation 1 (Beddiar, 2001 ; Bourgès-Gastaud, 2014) :

$$Q_{ee} = K_e \cdot \frac{V}{L} \cdot A \quad (1)$$

avec :

$Q_{ee}$  : débit électroosmotique en  $m^3/s$

$K_e$  : coefficient de perméabilité électroosmotique en  $m^2/sV$

$V/L$  : gradient de potentiel électrique appliqué  $V/m$ , avec  $V$  potentiel électrique en volt et  $L$  épaisseur de l'échantillon en m.

$A$  : section transversale droite à l'écoulement  $m^2$

- L'électromigration ou migration des ions est le déplacement des ions dû à l'application d'une différence de potentiel électrique. Durant l'application d'une différence de potentiel électrique, les électrodes se polarisent. Nous avons l'anode qui est l'électrode positive et la cathode qui est l'électrode négative. Sous l'effet du gradient de potentiel électrique, les cations (ions de signe positif) migrent vers la cathode et les anions (ions de signe négatif) migrent vers l'anode.

Durant l'électrocinétique, nous avons l'apparition de deux fronts, qui sont un front acide au niveau de l'anode et un front basique au niveau de la cathode. Ces deux fronts sont importants pour la dépollution des sédiments durant l'électrocinétique. Un milieu acide permet la solubilisation des polluants présents sous forme solide dans les sédiments (Acar et al., 1995). Plusieurs auteurs affirment que le pH du fluide interstitiel a une influence sur le coefficient de perméabilité électro-osmotique (Beddiar, 2001 ; Cameselle et Reddy, 2012). Au vu des informations précédentes, il est important de mesurer l'impact de la constitution des sédiments et du pH du liquide interstitiel sur les paramètres de l'électrocinétiques qui sont

le coefficient de perméabilité électrocinétique et la consommation énergétique. Pour ce faire une étude expérimentale est menée.

**4.1. Étude expérimentale**

Cette étude expérimentale est menée avec une cellule permettant d’appliquer une contrainte verticale de consolidation, afin de simuler l’état de consolidation dans lequel se trouvent les sédiments en fond de bassin, une différence de potentiel électrique, et une charge hydraulique (Figure 3). Les paramètres mesurés sont le coefficient de perméabilité électro-osmotique, l’intensité du courant, le pH des boues avant et après l’application de la différence de potentiel électrique. Une étude paramétrique est effectuée sur la constitution des boues et le pH des solutions interstitielles. Les différents essais menés sont présentés dans le Tableau 1.

Les boues sont préparées avec de la kaolinite et du limon à des siccités variables (la siccité est le rapport de la masse solide sur la masse totale de la boue (Bourgès-Gastaud et al., 2014)). Les solutions utilisées pour la préparation de la boue sont aussi celles utilisées pour les mesures. Les solutions acides sont préparées avec de l’eau distillée et de l’acide chlorhydrique ; les solutions basiques sont préparées avec de l’eau distillée et de la soude. La siccité est définie par l’équation 2 :

$$\text{Siccité} = \frac{\text{Masse solide}}{\text{Masse liquide} + \text{Masse solide}} \times 100 (\%) \tag{2}$$

Tableau 1 Paramètres des différentes expériences, pH eau distillée = 7

Essais	EK1	EK2	EK3	EK4	EK5	EK6	EK7	EK8	EK9	EK10	EK11
%Kaolinite	0	25	50	75	100	25	25	25	25	25	25
%Limon	100	75	50	25	0	75	75	75	75	75	75
pH/solution utilisée	Eau distillée	pH = 2	pH = 4	pH = 6	pH = 8	pH = 10	pH = 12				

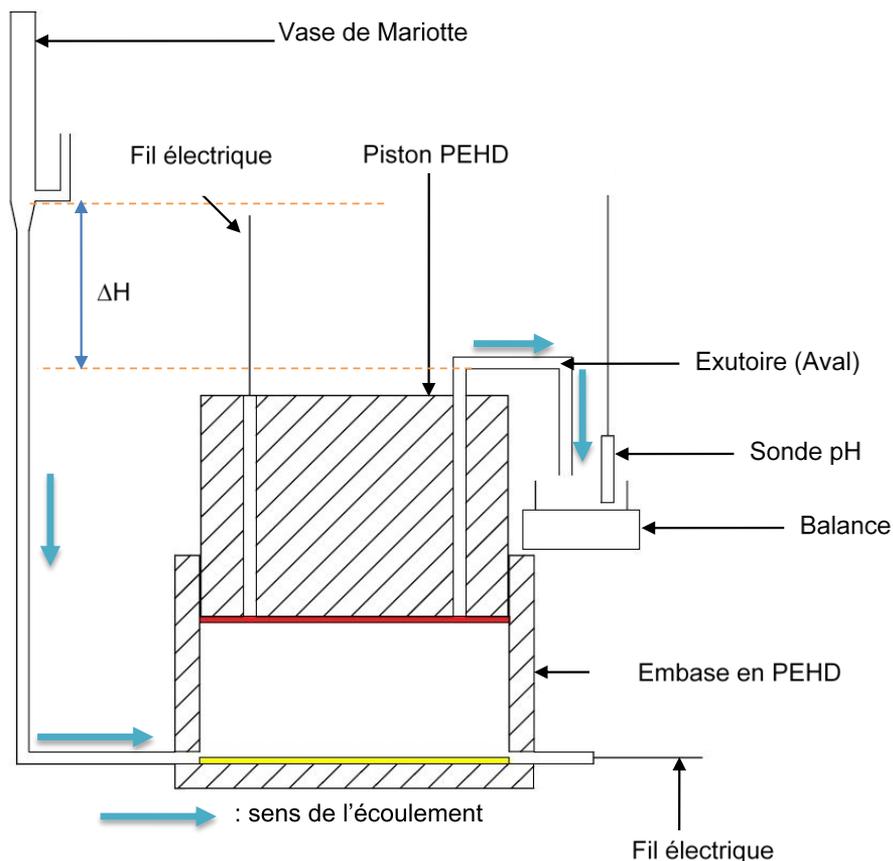


Figure 3. Cellule d’œdo-perméamètre modifié

## 4.2. Résultats

### 4.2.1. Coefficient de perméabilité électro-osmotique

Sur les Figures 4 et 5, il est observé que le coefficient de perméabilité électro-osmotique amont varie en fonction de la composition de la boue et du pH des solutions utilisées. La valeur du coefficient de perméabilité électro-osmotique est comprise entre  $1,37 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{sV})$  pour une boue composée uniquement de limon et  $3,42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{sV})$  pour une boue composée uniquement de kaolinite. Le coefficient de perméabilité électro-osmotique croît avec le pourcentage de kaolinite (particules fines dans la boue). Le coefficient de perméabilité électro-osmotique augmente de  $1,64 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{sV})$  pour une solution de  $\text{pH} = 2,37$  à  $2,50 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{sV})$  pour une solution de  $\text{pH} = 12,15$ . Ainsi, plus le pH est basique, plus le coefficient de perméabilité électro-osmotique est élevé. Les valeurs mesurées dans notre étude correspondent aux valeurs trouvées dans la littérature (Tableau 2).

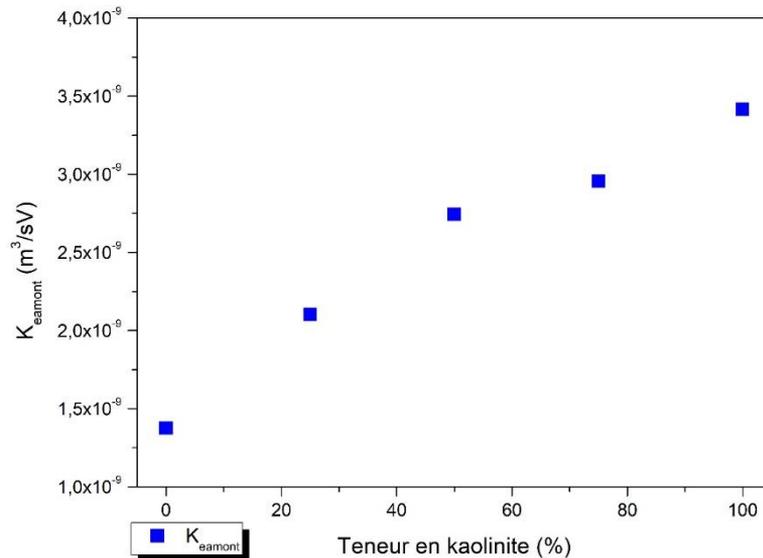


Figure 4. Coefficient de perméabilité électro-osmotique en fonction du pourcentage de kaolinite

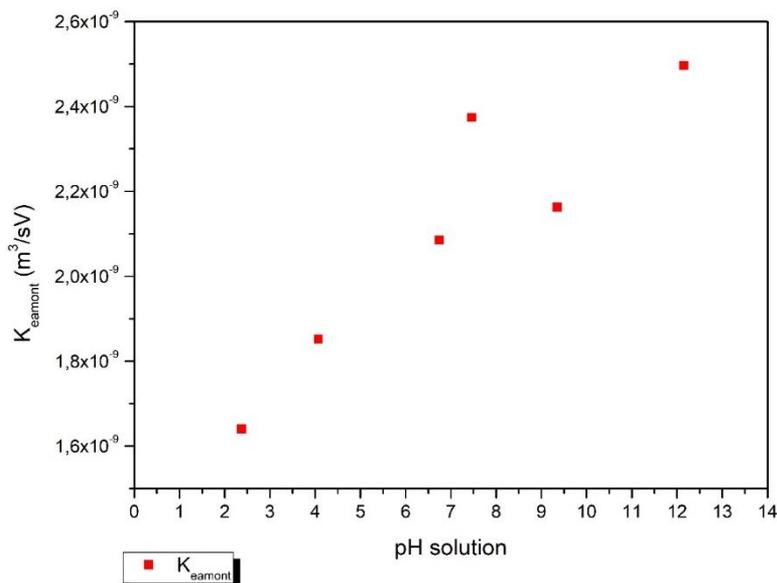


Figure 5. Évolution du coefficient de perméabilité électro-osmotique en fonction du pH

Tableau 2 Valeurs du coefficient de perméabilité électroosmotique

$K_e$ (m <sup>2</sup> /(sV))	Matériaux	Fluides	Références
$7.10^{-9}$	Kaolinite	Eau distillée + NaCl	(Beddiar, 2001; Beddiar et al., 2005)
$1.10^{-9}$	Kaolinite	Eau distillée	(Acar et Alshawabkeh, 1996)
$5.10^{-9}$	Kaolinite, limon, bentonite	Eau	(Casagrande, 1949)
$1,5.10^{-9}$	Boue	Eau	(Glendinning et al., 2008)
$0,6.10^{-9}$	NA	Eau	(Golenko, 1977)
$3,16.10^{-9}$	Argile compactée	NA	(Yeung et al., 1992)
$9,16.10^{-9}$	Sédiments marins	Eau distillée + NaCl + NaOH	(Mohamedelhassan et Shang, 2001)
$2,86.10^{-9}$	Sols argileux	Eau distillée	(Shang, 1997)
$1,197.10^{-9}$	Argile	Eau du robinet	(Jeyakanthan et al., 2011)

#### 4.2.2 Variation du pH

Le pH initial varie très peu en fonction du pH de la solution : il reste acide et se situe autour de 6, sauf pour les deux extrêmes de pH de la solution (Figure 7). Le pH initial varie très peu également en fonction de la teneur en kaolinite des boues. On remarque sur la Figure 6 que la boue constituée uniquement de limon a un pH initial de 8 et la présence de kaolinite dans la boue entraîne une chute du pH initial à 5. Le pH final dans l'échantillon est égal au pH initial pour tous les essais. On remarque sur les Figures 6 et 7 que, quel que soit le pH de la solution utilisée ou la composition de la boue, il y a l'apparition du front basique au niveau de la cathode et l'apparition du front acide au niveau de l'anode. La formation de ces deux fronts ne dépend donc pas du pH de la solution utilisée mais uniquement des réactions chimiques qui se produisent au niveau des électrodes.

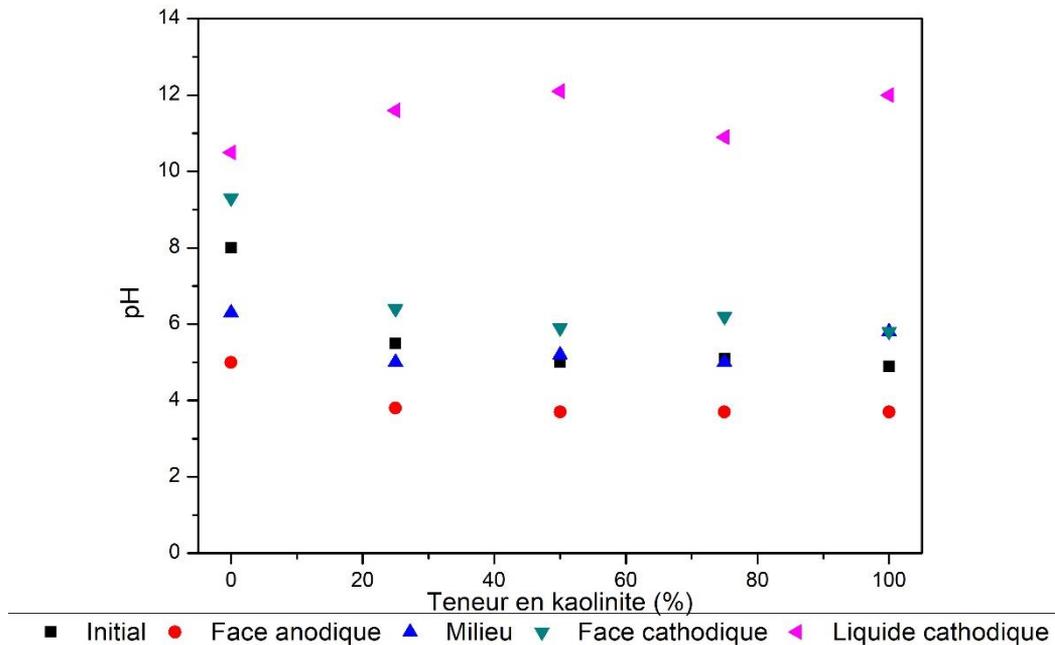


Figure 6. Évolution du pH en différents points en fonction du pourcentage de kaolinite

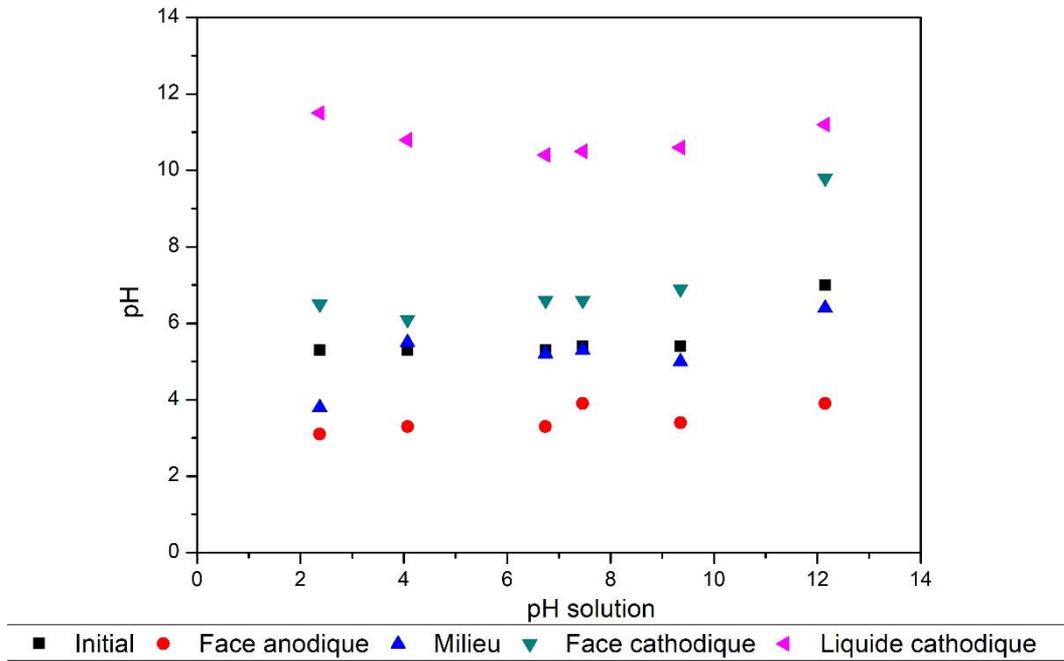


Figure 7. Valeur de pH à différents points de l'échantillon en fonction du pH de la solution

#### 4.2.3 Consommation énergétique

Il est important de suivre l'intensité du courant électrique car elle permet d'estimer la consommation d'énergie pour le traitement des sédiments. L'intensité varie en fonction de la composition de la boue. Plus le pourcentage de particules fines (ici la kaolinite) est élevé, plus l'intensité du courant électrique est grande (Figure 8). Pour une tension de 10V appliquée, on a une intensité de 10mA pour le limon, 180mA pour la kaolinite. L'intensité du courant mesurée varie en fonction du pH, les valeurs maximales sont observées pour les extrêmes de pH de solution (Figure 9). Par exemple, si nous prenons une tension de 10V nous avons 146,67mA et 156,67mA respectivement pour le pH de solution de 12,15 et le pH de solution de 2,37. Cela peut s'expliquer par le fait que nos solutions à pH très basique et très acide contiennent une concentration élevée d'ions. Cette concentration élevée d'ions augmente la conductivité électrique de la solution.

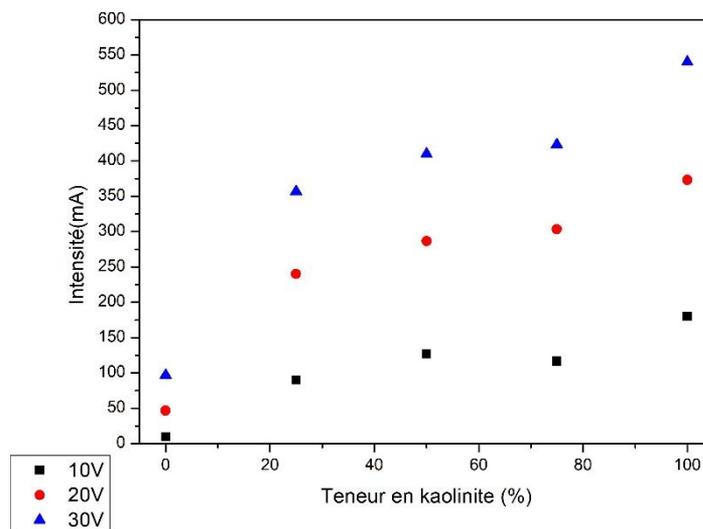


Figure 8. Évolution de l'intensité en fonction de la teneur en kaolinite pour différents potentiels électriques

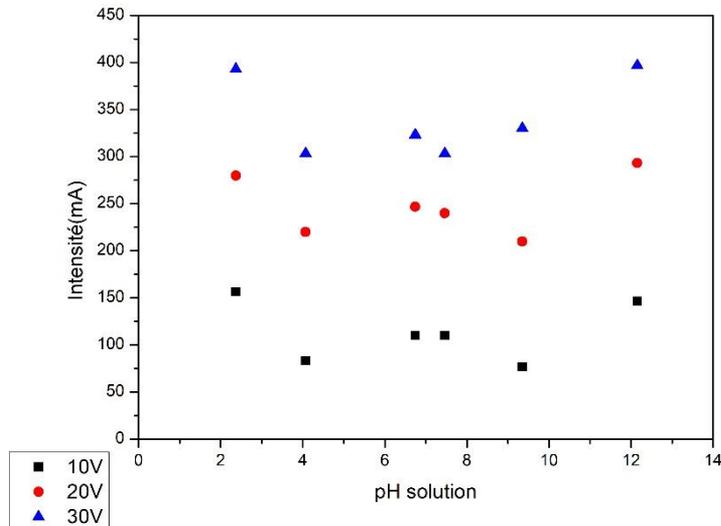


Figure 9. Variation de l'intensité en fonction du pH de la solution pour différents potentiels électriques

## 5. Conclusions

Cette communication a pour objectif de présenter des géocomposites innovants, incorporant une fonction électrocinétique pour la dépollution et l'essorage des sédiments dragués. Cette étude s'est concentrée sur l'impact de l'électrocinétique appliqué à une boue en termes de flux hydraulique et de variation de pH. De cette étude, il ressort que le coefficient de perméabilité électroosmotique est sensible au pH de la solution utilisée pour le traitement et à la composition des boues à traiter. Ces deux paramètres ont également une influence sur la consommation énergétique durant le traitement, qui est une contrainte pour une application à grande échelle du traitement des sédiments par électrocinétique. D'un point de vue pratique, les conclusions qui ressortent des résultats obtenus sont que le traitement des sédiments par électrocinétique peut être appliqué à un sédiment quel que soit sa composition et le pH de la solution utilisée. En effet, le coefficient de perméabilité électroosmotique varie mais reste toujours du même ordre de grandeur. Pour la consommation électrique, la composition de la boue et le pH de la solution utilisée sont des facteurs prépondérants et, pour chaque sédiment à traiter, des tests seront nécessaires pour déterminer cette consommation électrique.

## 6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier BPI France pour son soutien financier ainsi que tous les partenaires impliqués dans le projet Valssinnov.

## 7. Références bibliographiques

- Acar Y.B., Alshawabkeh A.N. (1996). Electrokinetic remediation. I: Pilot-scale tests with lead-spiked kaolinite. *J. Geotech. Engrg.* 122, 173-185.
- Acar Y.B., Gale R.J., Alshawabkeh A.N., Marks R.E., Puppala S., Bricka M., Parker R. (1995). Electrokinetic remediation: Basics and technology status. *J. Hazard. Mater.* 40, 117-137.
- AFNOR (2015). NF EN ISO 10318-1 (mai 2015). Géosynthétiques — Partie 1 : Termes et définitions.
- Alary C., Lemiere B., Haouche L. (2011). Granulométrie et contamination comparées des sédiments des voies navigables en Wallonie et nord de la France, enjeux pour la valorisation. *Mines et Carrières*, 25-33.
- Beddiar K. (2001). Sur certains aspects des couplages dans les milieux poreux électrisés: Application à l'électro-osmose dans les argiles. Thèse de doctorat en Mécanique, matériaux, géotechnique. École Nationale des Ponts et Chaussées, 212 pages.

- Beddiar K., Fen-Chong T., Dupas A., Berthaud Y., Dangla P. (2005). Role of pH in electro-osmosis: Experimental study on NaCl–water saturated kaolinite. *Transport in Porous Media* 61, 93-107.
- Bourgès-Gastaud S. (2014). Développement de géocomposites innovants dédiés à l'assèchement de boues minières : contribution des phénomènes mécanique et électro-osmotique. *Océan, atmosphère hydrologie*. Université de Grenoble, p. 317.
- Bourgès-Gastaud S., Stoltz G., Sidjui F., Touze-Foltz N. (2014). Nonwoven geotextiles to filter clayey sludge: An experimental study. *Geotextiles and Geomembranes* 42, 214-223.
- Cameselle C., Reddy K.R. (2012). Development and enhancement of electro-osmotic flow for the removal of contaminants from soils. *Electrochim. Acta* 86, 10-22.
- Casagrande I.L. (1949). Electro-osmosis in soils. *Geotechnique* 1, 159-177.
- Delcour, P., Hébrard C. (2012). Valorisation des sédiments fluviaux : Analyse prospective des filières de valorisation envisageables en région Nord-Pas-de-Calais. *Voies Navigables de France- Direction Nord-Pas de Calais*, 82 pages.
- Glendinning S., Jones C.J.F.P., Pugh R.C. (2005). Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics. *Int. J. Geomech.* 5, 138-146.
- Glendinning S., Lamont-Black J., Jones C.J.F.P., Hall J. (2008). Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics. *Geosynth. Int.* 15, 192-204.
- Golenko N. (1977). Electro-osmotic and hydraulic flow in soils with a varying porosity. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 14, 42-46.
- Jeyakanthan V., Gnanendran C., Lo S.-C. (2011). Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay. *Canadian Geotechnical Journal* 48, 1788-1802.
- Mohamedelhassan E., Shang J. (2001). Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement* 5, 3-11.
- Nguyen T.B. (2008). Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL (r) dans des matériaux d'assises de chaussée. *Comportement mécanique et environnemental*. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Scordia P.-Y. (2008). Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. *École Centrale de Lille*.
- Shang J.Q. (1997). Electokinetic dewatering of clay slurries as engineered soil covers. *Canadian Geotechnical Journal* 34, 78-86.
- Solène T. (2013). Procédé innovant de traitement de la fraction fine de sédiments pollués. *Techniques de l'ingénieur Innovations en énergie et environnement base documentaire : TIB503DUO*.
- Yeung A.T., Sadek S.M., Mitchell J.K. (1992). A new apparatus for the evaluation of electro-kinetic processes in hazardous waste management. *Geotechnical Testing Journal* 15, 207-216.

