



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Etude expérimentale de l'effet du processus électro-osmotique dans un sol fin salin de la région de Mostaganem

Experimental study of the effect of electroosmotic process of a saline fine-grained soil of Mostaganem region

Faiza Klouche^a, Karim Bendani^{a,*}, Ahmed Benamar^b, Hanifi Missoum^a, Nadia Laredj^a

^a Laboratoire Construction, Transport et Protection de l'Environnement « LCTPE », Université de Mostaganem, Algérie

^b Laboratoire Ondes et milieux complexes, UMR 6294, CNRS- Université Le Havre Normandie, France

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 25 Mai 2018

Révisé : 18 Juillet 2018

Accepté : 22 Juillet 2018

Mots clés:

Flux électro-osmotique

Courant électrique

Sol limoneux

Assèchement

Keywords :

Electro-osmotic flow

Electric current

Silty soil

Dewatering

RESUME

En génie civil, l'électro-osmose est une technique utilisée comme moyen de déshydratation et de traitement des sols fins pour l'amélioration et la dépollution. Elle est aussi utilisée en agriculture pour la désalinisation des sols. Dans cette étude, l'effet de l'électro-osmose sur les propriétés d'un sol fin de la région d'Ain Nouissy-Mostaganem sous une différence de potentiel électrique a été analysée. L'objectif est d'étudier le comportement de l'écoulement hydrique et la modification de certains paramètres, tels que la conductivité électrique, le pH et les limites d'Atterberg durant et après le processus électrocinétique. Ces paramètres permettent de comprendre et de contrôler la performance de cette technique vis-à-vis du traitement considéré. Le chauffage du sol durant ce processus a été abordé à travers la température de surface, indiquant une perte d'énergie relative lorsque le gradient de tension dépasse une valeur optimale.

ABSTRACT

In civil engineering, electro-osmosis is a technique used as a means of dehydration, treatment of fine soils for the improvement and remediation. It is also used in agriculture for the desalinization of soils. In this study, the effect of electro-osmosis on the properties of a fine soil of the Ain Nouissy-Mostaganem region under a difference of electric potential was analyzed. The objective is to study the behavior of the water flow and the modification of some parameters, such as the electrical conductivity, the pH and the Atterberg limits during and after the electrokinetic process. These parameters make it possible to understand and control the performance of this technique with respect to the treatment under consideration. Soil heating during this process was approached through the surface temperature, indicating a loss of relative energy when the voltage gradient exceeds an optimal value.

* Corresponding author. Tel.: +213 771723858.

E-mail address: karim.bendani@univ-mosta.dz

1 Introduction

L'utilisation de l'électro-osmose dans l'ingénierie géotechnique est utilisée depuis longtemps, notamment pour traiter les sols argileux et limoneux [1], comme rapporté par Casagrande [2], Chew et al. [3], Rittirong et al. [4] et Jones et al. [5]. Son application a été testée dans plusieurs secteurs, comme la protection des matériaux poreux vis-à-vis de la remontée capillaire par effet de succion, la consolidation des sols (par effet de couplage hydro-électrique), ainsi que la déshydratation des sols fins [6]. La stabilité des sols dépend en grande partie de la présence de l'eau, pour cela l'assèchement par électro-osmose est une technique de drainage des sols fins, réduisant ainsi, la pression interstitielle.

Cette technique nécessite une durée de traitement relativement courte (96 heures) par rapport à la méthode de désorption thermique qui dure plus longtemps. Elle peut être aussi mise en œuvre en laboratoire et sur le terrain. L'utilisation du traitement électrocinétique est actuellement déployée dans plusieurs pays comme méthode viable de stabilisation et de traitement des sols et des sédiments. [7-9].

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude du traitement électrocinétique [10-14]. L'électrocinétique consiste en l'application d'un courant électrique dans un sol ou dans l'eau souterraine (nappe phréatique) pour concentrer les espèces chimiques ioniques. C'est une technique émergente qui utilise un courant électrique continu (DC) ou une faible différence de potentiel électrique dans les sols fins tels que boues, sédiments et sols argileux [15] afin de déplacer les particules ionisées vers les compartiments d'électrodes.

L'électrocinétique comprend trois processus différents : l'électro-osmose, l'électro-migration et l'électrophorèse.

Dans le processus électro-osmotique, il y a un écoulement d'eau sous l'effet de l'application d'un courant électrique. Ce processus contribue au drainage de l'eau présente dans le sol et à la consolidation du sol. L'électro-osmose qui facilite le mouvement de l'eau est une technique qui est utilisée notamment pour la déshydratation des sols fins.

En appliquant un courant électrique, les espèces chargées présentes dans la solution du sol, migrent vers une électrode de charge opposée. Pendant le mouvement, les ions entraînent l'eau interstitielle par une action visqueuse. Une charge mobile positive nette, existe dans la double couche électrique, puisque la charge nette sur la surface des particules du sol est toujours négative [16,17].

Le flux électro-osmotique est le résultat de l'interaction électrochimique du champ électrique, des particules du sol et du fluide interstitiel.

En général, les particules du sol fin sont chargées négativement, puisque la matière est globalement neutre et une série de contre-ions neutralisent cette charge. Ainsi, les contre-ions sont concentrés dans la couche diffuse de la double couche électrique. Sous l'effet d'un champ électrique, l'excès d'ions dans la couche diffuse près de la surface de la particule du sol, migrent dans un plan parallèle à la surface du sol dans la direction de l'électrode opposée. Ces ions sont en solution aqueuse, donc solvatés. Dans leur mouvement, les ions entraînent les molécules d'eau solvatées.

Ce mouvement est transmis aux molécules voisines, en raison de l'interaction dipôle-dipôle, formant un profil plat de l'eau qui coule à travers les pores. En général, les particules du sol sont électronégatives, de sorte que les contre-ions seront positifs, d'où la direction de l'écoulement électro-osmotique vers la cathode. L'électro-osmose est le principal mécanisme de transport des contaminants inorganiques et organiques en solution ou émulsionnés dans le liquide interstitiel [1,18-20].

Dans ce travail, les aspects chimiques et physiques induits par le traitement électrocinétique sur un sol fin, tels que les variations de pH, la température et le débit d'électro-osmose, sont étudiés à travers une série d'essais en cellule de laboratoire sur des échantillons d'un sol limoneux-argileux soumis à différentes tensions électriques.

2 Essais et procédure

2.1 Dispositif expérimental

Les tests électrocinétiques ont été menés dans une cellule de forme parallélépipédique avec des parois en verre de 8mm d'épaisseur et dont les dimensions sont les suivantes : longueur 30 cm ; largeur 10 cm et hauteur 10 cm, comprenant trois compartiments : anode, sol et cathode.

Les deux compartiments de l'anode et de la cathode contiennent chacun un exutoire, permettant l'écoulement du flux électro-osmotique (quantité d'eau recueillie dans une éprouvette graduée). Les parois séparant les compartiments sont des grilles perforées (ouverture 8mm). Deux électrodes tubulaires en cuivre de 16 mm de diamètre sont placées à l'anode et à la cathode à 2cm des extrémités de l'échantillon. Des papiers filtres [Whatman n°4] sont placés contre les grilles séparant le sol des compartiments cathodiques, pour empêcher le déplacement des particules du sol vers ces compartiments.

Les dimensions de l'échantillon de sol sont : longueur 20 cm, largeur 10 cm et hauteur 10 cm. Le schéma du dispositif expérimental est présenté dans la Figure 1.

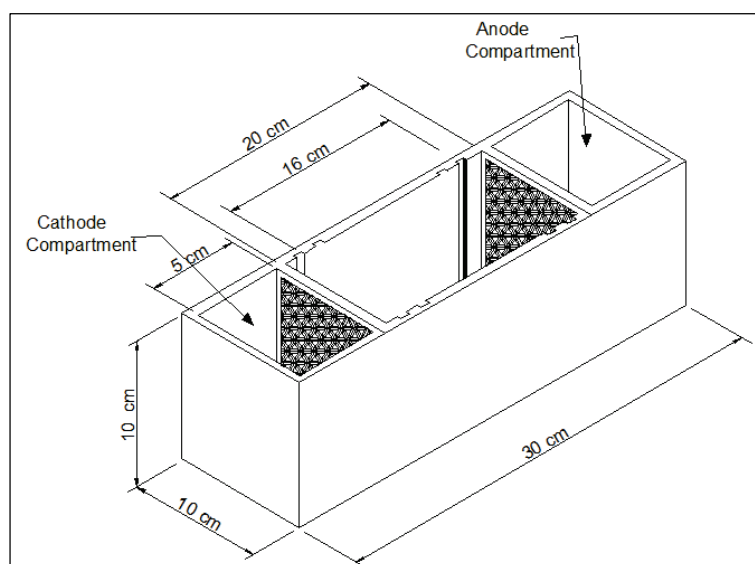


Fig. 1- Schéma de la cellule du traitement électrocinétique

2.2 Caractéristiques du sol

L'échantillon de sol a été prélevé sur un terrain situé dans la région d'Ain Nouissy-Mostaganem.

Les limites d'Atterberg et la valeur du bleu de méthylène ont été déterminées selon les normes françaises NF P94-051 et NF P94-68 respectivement. Le pH, la matière organique et la conductivité électrique ont été déterminés selon les normes NF X 31-103, NF EN 12879-2000 et NF X 31-113 respectivement.

Des essais géotechniques réalisés en laboratoire ont montré que le sol considéré est un limon argileux de plasticité moyenne. L'analyse de classement du sol révèle que le matériau est composé de 62% de limon, 30% d'argile et 8% de sable. Les tableaux 1 et 2 montrent les propriétés physico-chimiques de l'échantillon utilisé.

Tableau 1- Composition chimique du sol d'Ain Nouissy-Mostaganem

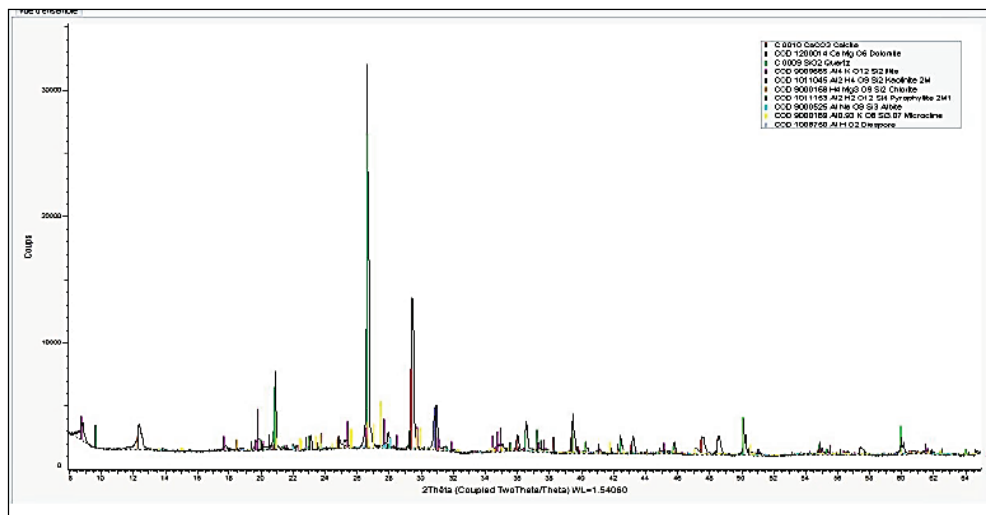
Constituants	Echantillon utilisé (%)
SiO ₂	46.71
Al ₂ O ₃	11.09
Fe ₂ O ₃	4.73
CaO	13.86
Na ₂ O	0.11
K ₂ O	1.87
MgO	2.68
SO ₃	0.07

Tableau 2- Propriétés physico-chimiques du sol d'Ain Nouissy (Mostaganem)

Propriétés	Valeurs
Limite de liquidité, LL (%)	42.8
Limite de plasticité, PL (%)	22.1
Indice de plasticité, Ip (%)	20.7
Classification du sol	Limon argileux (plasticité moyenne)
Argile (%)	30
Limon (%)	62
Sable (%)	8
Valeur bleu méthylène (mg/g)	2.83
Poids volumique sec (kN/m ³)	15
pH	8.5
EC (mS/cm)	2.5
Matières organiques (wt %)	5.51
Concentrations initiales en solutés (mg/kg)	
Cl ⁻	700
Na ⁺	1917.2
Ca ²⁺	1165

Le courant électrique est généré par une alimentation de courant continu réglable et les paramètres de contrôle électriques sont mesurés à l'aide d'une carte d'acquisition des données (Arduino méga 2560).

La figure 2 illustre la courbe DRX du sol d'Ain Nouissy. L'analyse par DRX de l'échantillon du sol montre l'existence de pics correspondants aux minéraux, tels que : la kaolinite, la calcite, le quartz, l'illite et la dolomite.

**Fig. 2 – Diffractogramme des rayons X du sol d'Ain Nouissy-Mostaganem**

3 Procédure d'essai électrocinétique

Une masse de sol (2600g) a été mélangée avec de l'eau désionisée pour obtenir une teneur en eau de 48%(5% supérieure à la limite de liquidité). Le matériau est mixé pendant une heure, jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et lisse, puis placé dans le réservoir de la cellule expérimentale en couches successives compactées à un poids volumique de 13 kN/cm³.

Le dispositif expérimental est illustré dans la figure 3, où le matériau est soumis à des gradients de potentiels différents : 15, 25, 35 et 45 volts. L'eau libre transférée dans le sol pour chaque voltage appliqué est recueillie dans des tubes gradués au niveau de l'électrode.

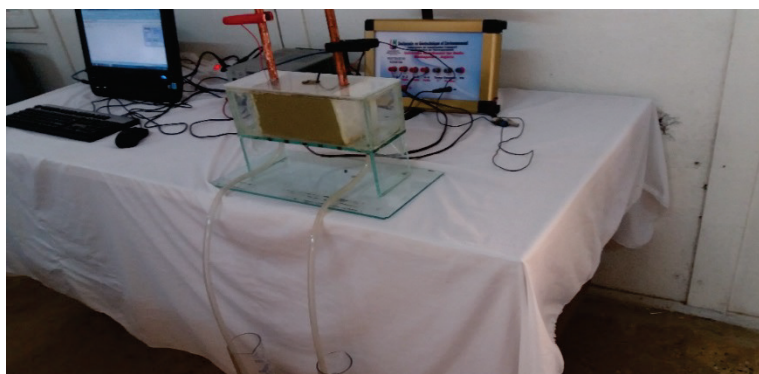


Fig. 3- Système d'acquisition des données électrocinétiques

4 Résultats et discussion

Lors de l'application du gradient de potentiel continu à travers les électrodes du sol, le milieu sol-liquide subit plusieurs changements physico-chimiques, hydrologiques et mécaniques, dus à plusieurs processus électrochimiques complexes, qui se déroulent dans le milieu poreux. Certains de ces processus sont initiés immédiatement après l'application du gradient de potentiel continu, tels que l'électrolyse de l'eau, l'électro-osmose et le courant électrique, tandis que plusieurs autres progressions se développent avec le temps. Cette évolution peut empêcher la poursuite des processus chimiques et électrocinétiques. L'observation la plus intéressante lors de ces expériences, est le développement de zones humides et sèches entre les électrodes, en raison du flux électro-osmotique positif de l'anode (électrode chargée positivement) vers la cathode (électrode chargée négativement).

4.1 Tension électrique

Les profils de tensions à 15, 25, 35 et 45 volts dans le sol à différentes durées (de 1 à 4 jours) ont été mesurés à l'aide de sondes situées au bas de l'échantillon. La figure 4 montre pour différents potentiels appliqués les résultats de chute de tension à la fin de chaque test.

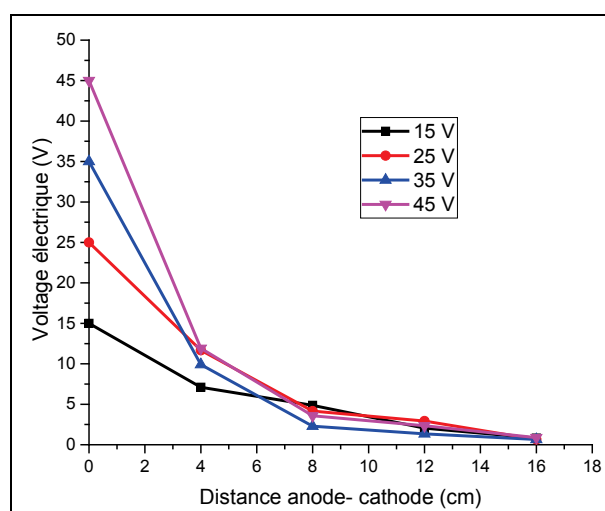


Fig. 4- Profil de chute de tension à la fin de chaque essai pour différents gradients de potentiel

Les résultats indiquent que plus le gradient de potentiel est élevé, plus la chute de tension est importante tout au long du milieu poreux et le long de la durée de l'expérimentation.

L'amplitude de la chute de tension dépend des propriétés de l'échantillon de sol, du gradient de potentiel appliqué et du matériau de l'électrode utilisé, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Mohamed el hassan et Shang [21].

4.2 Courant électrique

L'évolution de l'intensité du courant électrique avec les différentes tensions appliquées (15, 25, 35 et 45 volts) en fonction du temps est présentée dans la figure 5.

Le courant électrique augmente tout d'abord et atteint une valeur maximale au cours des 12 premières heures, puis diminue progressivement et se stabilise enfin au bout des 72 heures de traitement ; Initialement, lorsque le gradient de tension est appliqué, le courant est faible en raison du temps pour que la solution se mette en mouvement au sein du sol. En quelques heures, le courant atteint une valeur de pic en raison de la forte concentration ionique qui s'accumule dans le fluide interstitiel aqueux. En effet, cette hausse du courant est directement corrélée à la variation du pH au sein du matériau, pH initialement légèrement basique (8,5) et qui s'acidifie à proximité de l'anode, à cause de l'électrolyse de l'eau qui génère des ions H^+ .

Le courant électrique devient négligeable après 72 h de traitement, cela indique une durée optimale qui ne dépend pas de la tension appliquée.

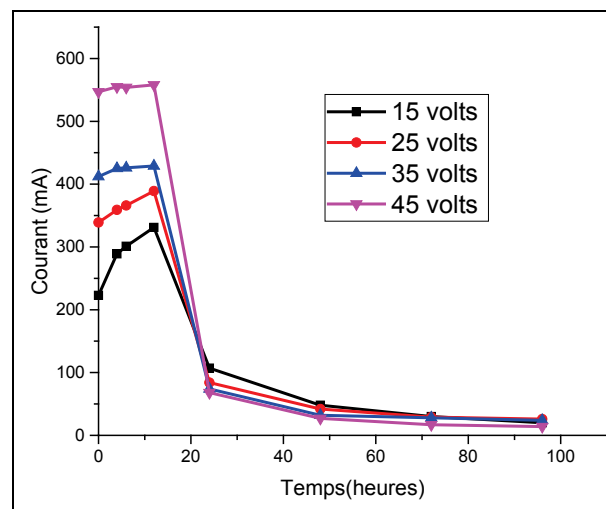


Fig. 5- Variation du courant électrique en fonction du temps

Le courant mesuré montre une diminution de sa valeur maximale qui est de : 223 mA, 339 mA, 412 mA et 547 mA, qui ont été enregistrées respectivement pour les tensions de 15, 25, 35 et 45 volts.

Au fil du temps, le flux de courant à travers le sol a diminué pour tomber en dessous de 18 mA en 4 jours (Fig.5).

4.3 Température

L'augmentation du courant électrique pendant les premières heures s'accompagne d'une augmentation de la température (effet Joule) dans le compartiment du sol, qui atteint $39^{\circ}C$. Ensuite le courant diminue progressivement, car la conductivité électrique commence à diminuer à cause de la variation du pH au niveau des deux zones anodique et cathodique avec l'évolution du front basique à la cathode en raison de la plus forte mobilité ionique de OH^- (Fig. 6).

Selon Vinogradov et Jackson [22], l'augmentation de la température de la matrice peut légèrement réduire le pH et provoquer la diminution du potentiel zêta qui, à son tour réduit le flux électro-osmotique.

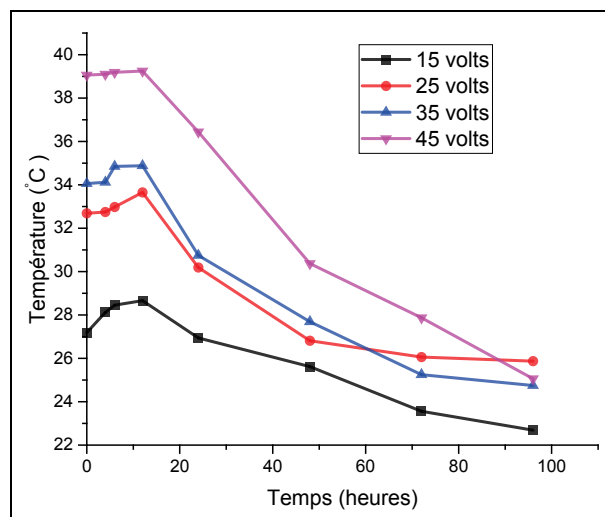


Fig.6- Variation des températures en fonction du temps

4.4 Flux et Perméabilité électro-osmotiques

Le volume d'eau recueilli à la cathode pendant le traitement électrocinétique est représenté dans la figure 7.

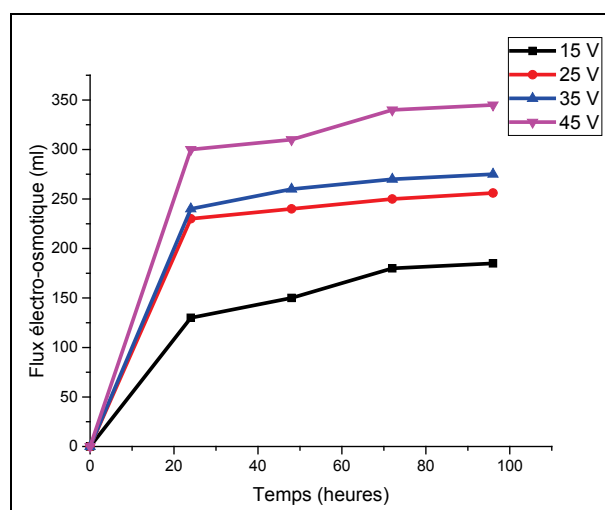


Fig. 7- Evolution du volume électro-osmotique durant l'électrocinétique

L'eau recueillie est due au mouvement de l'eau de l'anode à la cathode suite au phénomène d'électro-osmose. Il est à noter que le volume d'eau collecté augmente avec l'augmentation de la tension appliquée de façon non linéaire.

Le flux électro-osmotique cumulé mesuré à la cathode montre une augmentation pendant les premières heures du processus, puis se stabilise à la fin de l'essai après 96 heures.

Quelles que soient les tensions appliquées, les différents tests ont montré une tendance similaire concernant le flux électro-osmotique : le débit d'eau récupérée en sortie de cathode augmente dans un premier temps, puis se stabilise, comme le montre la figure 7. En effet, un faible gradient de tension égal à 15 volts montre une influence négligeable sur le drainage, tandis qu'un potentiel de 45 volts, montre un drainage plus important. En effet, sous l'effet d'un champ électrique, les ions présents en solution migrent, entraînant avec eux (par transfert d'énergie cinétique) les molécules neutres de solvant. Dans le cas de notre matériau, dont la surface est globalement chargée négativement, les contre-ions positifs, présents en excès dans la double couche, vont transmettre une force d'entraînement importante au solvant. Il en résulte un mouvement net du fluide dans la direction de migration des cations, c'est-à-dire de l'anode vers la cathode : cela correspond au flux électro-osmotique. Les cations majoritaires étant les ions H^+ , de mobilité ionique plus importante que les ions OH^- , on comprend

alors que l'augmentation de leur dissociation entraîne un flux électro-osmotique (donc un drainage) plus important. Le flux électro-osmotique dépend du potentiel zêta, qui est une fonction complexe des propriétés du sol et de la composition chimique de l'eau interstitielle [23].

Dans les quatre tests à (15, 25, 35 et 45 volts) effectués à des moments différents, le flux électro-osmotique est dirigé de l'anode vers la cathode. Lorsque les ions ont migré électriquement vers les électrodes, ils ont transmis l'impulsion aux molécules de la solution et l'écoulement est lié à la quantité nette de migration ionique vers un emplacement d'électrode. De plus, puisque le flux électro-osmotique dans les essais était dirigé vers la cathode, cela suggère que les ions dominants présents dans le sol étaient sous forme cationique car les particules de sol sont chargées négativement. Pendant les premières heures, le flux électro-osmotique était insignifiant et les surfaces des particules du sol possédaient des charges moins négatives, en raison de la forte concentration résultant de la réduction du potentiel zêta. Après 24 h, le flux électro-osmotique a commencé à se produire sans interruption jusqu'à la fin de l'essai et le volume électro-osmotique a augmenté moins vite car le potentiel zêta a dû changer en raison de la variation de Ph (front acide à l'anode et basique à la cathode).

Le potentiel zêta de la plupart des particules chargées dépend de la force ionique, du type d'espèces ioniques et du pH du sol. Le flux électro-osmotique peut être calculé par l'équation (1) de Helmutz-Smoluhowski :

$$Q_e = K_e \cdot E \cdot A \quad (1)$$

$$K_e = -\zeta \frac{\varepsilon}{4\pi\eta} \quad (2)$$

Q_e est le débit électro-osmotique (cm^3 / s), K_e le coefficient de perméabilité électro-osmotique (cm^2 / Vs), E le gradient potentiel (V / cm), A la section transversale cm^2 , η la cinétique de viscosité du liquide pur (Ns / cm^2), ε la constante diélectrique du liquide pur ($V cm$), ζ le potentiel zêta du sol (V).

La variation de la perméabilité électro-osmotique pendant le traitement est illustré sur la figure 8. Les résultats montrent que les valeurs de K_e diminuent avec le temps de traitement et avec les différentes tensions appliquées.

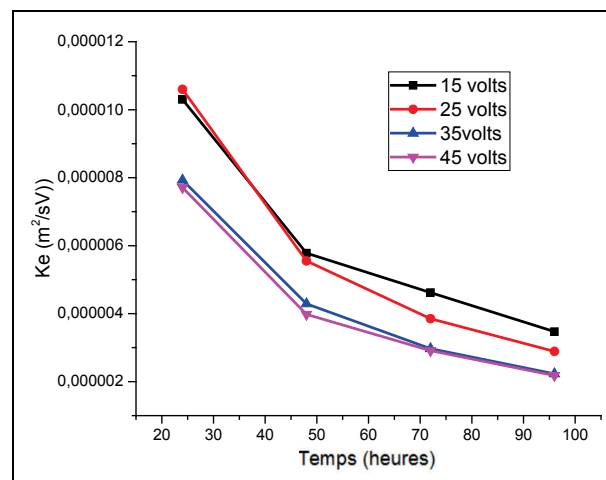


Fig. 8- Variations de la perméabilité électro-osmotique pendant le traitement

Les valeurs du coefficient de perméabilité électro-osmotique varient pendant le traitement électrocinétique. Cette variation est due à la modification de la charge de la surface du sol. Les changements de K_e dépendent aussi des variations de pH et de la réduction de la teneur en eau.

Shang [24] a indiqué que la valeur de K_e dépend du potentiel zêta. La variation du potentiel zêta est fonction des changements de pH. A cet effet, les valeurs de pH ne sont pas les mêmes le long de l'échantillon, donc le potentiel zêta n'est pas constant et cela conduit à la réduction de K_e . L'écoulement de l'eau à la cathode est alors diminué par la réduction de K_e .

4.5 pH du sol

La figure 9 montre la variation de pH du sol à différents gradients de potentiel appliqués à la fin de l'essai. En conséquence, on peut voir que la valeur de pH augmente sur toute la distance entre l'anode et la cathode.

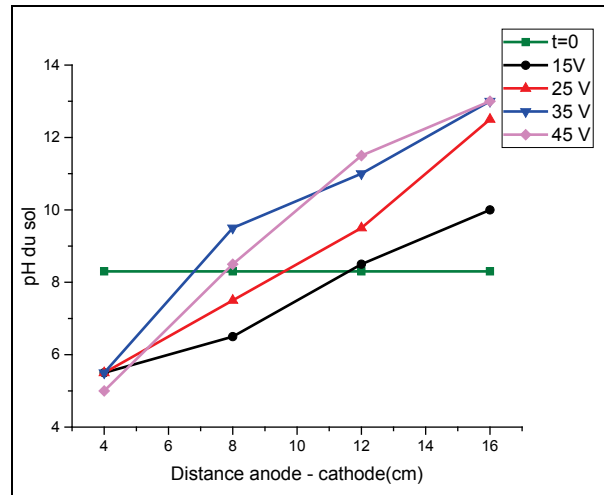
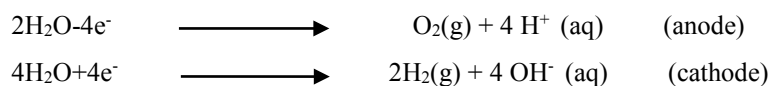


Fig. 9- Evolution du pH le long de la distance anode-cathode

Les changements dans les valeurs de pH dans le réservoir d'électrode dans le temps, montrent que la valeur de pH initiale (8,5) est en augmentation à la cathode et en diminution à l'anode. Les résultats montrent aussi que le taux de changement de pH dépend de la valeur de la tension appliquée.

Des tensions appliquées plus élevées ont entraîné des taux de changement de pH plus élevés. La réduction de la tension appliquée a entraîné moins d'ions produits par électrolyse. Cela a conduit à la migration des anions et des cations, créant le front acide à l'anode et basique à la cathode pendant le processus électrocinétique.

Sur la base des résultats du changement de pH à l'anode et à la cathode, lors de l'application du courant électrique, les réactions chimiques suivantes se produisent :



Ces réactions à la cathode et à l'anode provoquent la création d'oxygène, de gaz d'hydrogène des ions H^+ et de OH^- sous forme aqueuse. Par conséquent, l'existence de H^+ dans l'anode diminue la valeur du pH et le liquide adjacent à l'anode devient acide ; par contre, dans la cathode il devient alcalin. En augmentant la tension appliquée, la quantité de H^+ et OH^- est augmentée et par conséquent, le pH atteint une valeur constante dans un temps relativement court.

4.6 Limites d'Atterberg et Conductivité électrique(CE)

La limite de liquidité (LL) et la limite de plasticité (PL) du sol ont été déterminées sur des échantillons de sol prélevés à la fin de chaque essai. Les valeurs initiales des limites d'Atterberg dans la cathode pour différentes tensions ont subi des variations et que ces variations dépendent de la tension appliquée et de la distance par rapport à l'anode. La variation des valeurs des limites d'Atterberg dépend aussi des changements de la qualité de l'eau interstitielle, de la distribution granulométrique et de la modification des minéraux argileux [5]. Le tableau 3 montre les variations des limites d'Atterberg pour les différentes tensions appliquées.

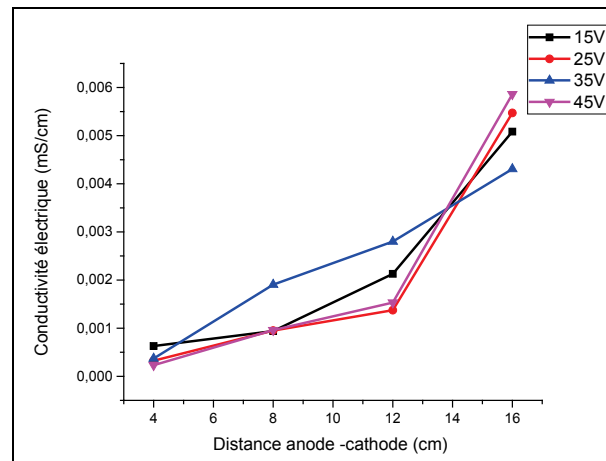
Les limites d'Atterberg du sol varient après chaque essai et leurs valeurs dépendent de la tension appliquée. En effet, le sol devient plus plastique quand le potentiel appliqué est plus important.

Pour différentes tensions appliquées, la variation de la conductivité électrique CE à la fin du processus montre que la valeur de la CE était plus grande dans le réservoir de la cathode que celle de l'anode et augmente avec le temps. Elle a atteint une valeur constante après 72 heures pour 45 volts et environ 96 heures pour 25 volts.

Tableau 3- Variation des limites d'Atterberg durant le processus électrocinétique

Tensions appliquées	Limites d'atterberg		
	Limite de liquidité LL	Limite de plasticité PL	Indice de plasticité %
Etat initial	42.8	22.1	20.7
15 volts	44.88	23.77	21.11
25 volts	47.43	25.97	21.46
35 volts	50.03	27.87	22.16
45 volts	52.99	29.85	23.14

L'augmentation de la CE peut être le résultat de l'accumulation des ions dissous, en particulier dans le réservoir de la cathode. Comme discuté précédemment, l'abaissement de pH dans l'anode crée un front acide qui passe de l'anode à la cathode et donc, les ions H^+ peuvent s'échanger avec les cations adsorbés dans la couche d'ions diffus autour des particules du sol à grains fins.

**Fig. 10- Variation de la conductivité électrique en fonction de la distance anode-cathode**

La figure 10 montre la variation de la conductivité électrique avec la distance anode-cathode. Les changements de conductivité électrique dans les réservoirs d'électrodes montrent l'augmentation de la CE avec la tension appliquée.

L'augmentation de la conductivité électrique peut être le résultat de l'accumulation d'ions dissous, en particulier dans le réservoir cathodique. Comme expliqué ci-dessus, la diminution du pH à l'anode crée un front acide, qui se déplace de l'anode à la cathode. Lorsque le front acide se déplace de l'anode à la cathode, les ions H^+ s'échangent avec les cations adsorbés dans la couche diffuse des ions autour des particules d'argile.

4.7 Teneur en eau et Consolidation

La figure 11 montre la variation de la teneur en eau le long de la distance anode-cathode sous les différentes tensions (15, 25, 35 et 45 volts). Dans ce cas, une quantité considérable d'eau s'est accumulée dans notre sol entre les électrodes.

On remarque des régions sèches près de l'anode et des zones humides près de la cathode. Ceci est attribué au mouvement de l'eau pendant le traitement électrocinétique par l'effet électro-osmotique.

Le tassement a été mesuré à mi-chemin entre les électrodes sur la surface de l'échantillon de notre sol. Les valeurs de tassement déterminées pour une durée de traitement de 96 heures sont de 12 et 17 mm pour 25 et 45 volts respectivement (Fig. 12).

Le tassement est généralement un indicateur indirect de la quantité d'eau drainée. Un tassement important du sol tend à caractériser des propriétés mécaniques plus élevées. Cependant, cette étude révèle que le tassement seul, qui peut être facilement mesuré et surveillé en temps réel peut ne pas refléter avec précision le renforcement mécanique du sol.

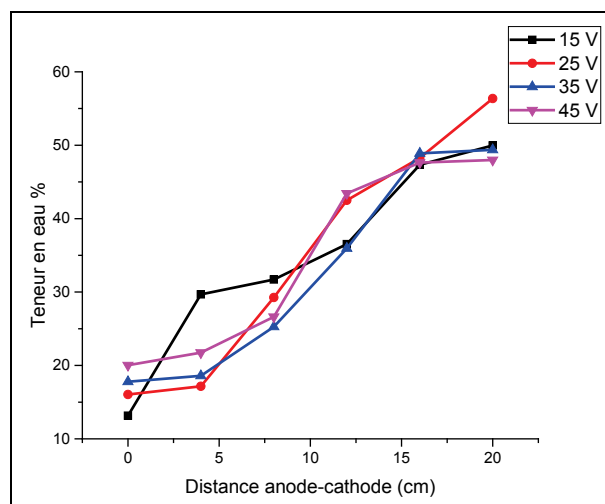


Fig. 11- Variation de la teneur en eau en fonction de la distance anode-cathode

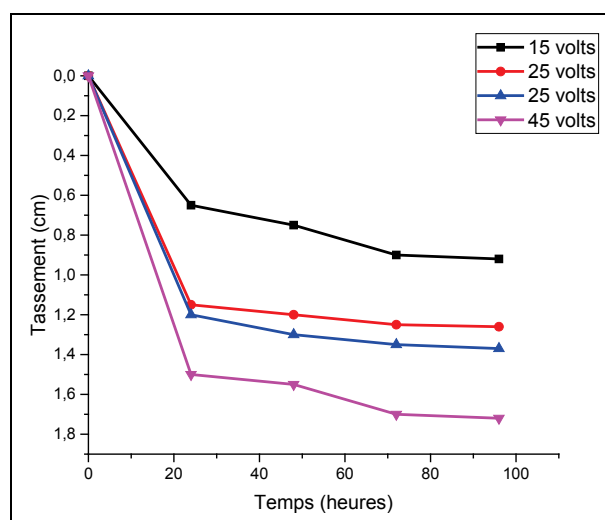


Fig.12-Variation du tassement avec le temps à différentes tensions

5 Conclusion

L'effet de l'électro-osmose sur le comportement hydro-électrique d'un sol limoneux de la région d'Ain Nouissy – Mostaganem a été étudié en réalisant des essais électrocinétiques en laboratoire avec des gradients de tension variant de 15 à 45 Volts et des temps de traitement allant de 1 à 4 jours. Pour mener cette expérimentation, une cellule électro-osmotique a été conçue et développée au laboratoire LCTPE à l'effet de mesurer un certain nombre de paramètres.

Les résultats ont montré que le processus électrocinétique a entraîné des variations dans certaines caractéristiques du sol qui sont dépendantes les unes des autres. Ces dépendances peuvent expliquer les raisons des différents résultats obtenus et qui ont montré que: L'électro-osmose est l'un des phénomènes électrocinétiques qui consiste en un mouvement de fluide à travers un milieu poreux sous l'influence d'un champ électrique. Les valeurs de pH et CE des réservoirs sont en baisse à l'anode et en hausse à la cathode avec l'augmentation de la tension appliquée et ce, pendant toute la durée du traitement. La valeur de K_e diminue avec le temps de traitement et avec l'augmentation de la tension appliquée. L'intensité du courant électrique dépend du potentiel imposé et varie au cours du traitement. Sous les différentes tensions appliquées, l'intensité du courant dans l'échantillon du sol diminue progressivement au cours du processus électro-osmotique sur toute la durée du traitement. Le flux électro-osmotique est en corrélation directe avec le courant électrique ; il diminue quand le courant électrique s'amointrit. La teneur en eau de l'échantillon dans tous les tests, diminue pendant le processus de traitement avec une teneur en eau plus élevée à la zone cathodique, ce qui provoque une consolidation du sol. Le tassement de l'échantillon suit la tendance du drainage : plus le volume d'eau drainé est important, plus le matériau se tasse et se consolide.

REFERENCES

- [1]- C.J. Bruell, B.A. Segall, M.T. Walsh, Electroosmotic removal of gasoline hydrocarbons and TEC from clay. *J. Environ. Eng.* 118(1) (1992) 68–83. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:1(68)
- [2]- L. Casagrande, Electro-osmosis stabilization of soils. *J. Boston Soc. Civ. Eng.* 39(1) (1952) 51–83.
- [3]- S.H. Chew, G.P. Karunaratne, V.M. Kuma, L.H. Lim, M.L. Toh, A.M. Hee, A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains. *Geotext. Geomembr.* 22(1–2) (2004) 17–35. doi:10.1016/S0266-1144(03)00049-9
- [4]- A. Rittirong, R.S. Douglas, J.Q. Shang, E.C. Lee, Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains. *Geosynth. Int.* 15(5) (2008) 369–381. doi:10.1680/gein.2008.15.5.369
- [5]- C.J.F.P. Jones, J. Lamont-Black, S. Glendinning, Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications. *Geotext Geomembr.* 29(4) (2011) 381–390. doi:10.1016/j.geotextmem.2010.11.011
- [6]- M.Y. Ahmed, S. Taibi, H. Souli, J.M. Fleureau, The Effect of pH on Electro-osmotic Flow in Argillaceous Rocks. *Geotech. Geol. Eng.* 31(4) (2013) 1335–1348. doi:10.1007/s10706-013-9656-0
- [7]- Y.B. Acar, A.N. Alshwabkeh, Electrokinetic remediation. I: Pilot-Scale tests with Lead-Spiked Kaolinite. *J. Geotech. Eng.* 122(3) (1996) 173–185. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:3(173)
- [8]- S. Micic, J.Q. Shang, K.Y. Lo, Y.N. Lee, S.W. Lee, Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current. *Can. Geotech. J.* 38(2) (2001) 287–302. doi:10.1139/t00-098
- [9]- M.T. Ammami, A. Benamar, H. Wang, C. Bailleul, M. Legras, F. Le Derf, F. Portet-Koltalo, Simultaneous electrokinetic removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and metals from a sediment using mixed enhancing agents. *Int. J. Environ. Sci. Te.* 11(7) (2013) 1801–1816. doi:10.1007/s13762-013-0395-9
- [10]- S.C. Chien, C.Y. Ou, Y.C. Lee, A Novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement. *Appl. Clay Sci.* 50(4) (2010) 481–492. doi:10.1016/j.clay.2010.09.014
- [11]- S.C. Chien, C.Y. Ou, W.W. Lo, Electroosmotic chemical treatment of clay with interbedded sand. *Proc. Inst. Civ. Eng. – Geotech. Eng.* 167(1) (2014) 62–71. doi:10.1680/geng.11.00076
- [12]- C.Y. Ou, S.C. Chien, C.C. Yang, C.T. Chen, Mechanism of soil cementation by electroosmotic chemical treatment. *Appl. Clay Sci.* 104 (2015) 135–142. doi:10.1016/j.clay.2014.11.020
- [13]- C.Y. Ou, S.C. Chien, R.H. Liu, A study of the effects of electrode spacing on the cementation region for electro-osmotic chemical treatment. *Appl. Clay Sci.* 104 (2015) 168–181. doi:10.1016/j.clay.2014.11.027
- [14]- J. Peng, H. Ye, A.N. Alshwabkeh, Soil improvement by electroosmotic grouting of saline solutions with vacuum drainage at the cathode. *Appl. Clay Sci.* 114 (2015) 53–60. doi:10.1016/j.clay.2015.05.012
- [15]- N. Mosavat, E. Oh, O. Chai, Laboratory assessment of kaolinite and bentonite under chemical-electrokinetic treatment. *J. Civil Environ. Eng.* 3(1) (2013) 1–7. doi:10.4172/2165-784X.1000125
- [16]- H.Q. Hong, L.M. Hu, Experimental Study of Electro-Osmosis by Reversing Polarity in Kaolin Clay. In: *Proceedings of the 1st Sri Lankan Geotechnical Society International Conference on Soil and Rock Engineering, Colombo, 2007.*
- [17]- O. Ait Ahmed, Z. Derriche, M. Kameche, A. Bahmani, H. Souli, P. Dubujet, J.M. Fleureau, Electro-remediation of lead contaminated kaolinite: An electrokinetic treatment. *Chem. Eng. Process.* 100(2016) 37–48. doi:10.1016/j.cep.2015.12.002
- [18]- C. Cameselle, K.R. Reddy, Development and enhancement of electro-osmotic flow for the removal of contaminants from soils. *Electrochim. Acta.* 86 (2012) 10–22. doi:10.1016/j.electacta.2012.06.121
- [19]- C. Cameselle, K. Reddy, Effects of periodic electric potential and electrolyte recirculation on electrochemical remediation of contaminant mixtures in clayey soils. *Water Air Soil Pollut.* 224(8) (2013) 1–13. doi:10.1007/s11270-013-1636-8
- [20]- A.T. Lima, P.J. Kleingeld, K. Heister, J.P.G. Loch, In situ electro-osmotic clean up of tar contaminated soil – Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Electrochim. Acta.* 86 (2012) 142–147. doi:10.1016/j.electacta.2011.12.060
- [21]- E. Mohamedel Hassan, J.Q. Shang, Effect of electrode materials and current intermittence in electroosmosis. *P. I. Civil Eng.-Ground Improv.* 5(1) (2001) 3–11. doi:10.1680/grim.2001.5.1.3
- [22]- J. Vinogradov, M.D. Jackson, Zeta potential in intact natural sandstones at elevated temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 42(15) (2015) 6287–6294. doi:10.1002/2015GL064795
- [23]- J.H. Chang, Y.C. Liao, The effect of critical operational parameters on the circulation-enhanced electrokinetics. *J. Hazard. Mater.* 129 (2006) 186–193. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.08.030
- [24]- J.Q. Shang, Zeta potential and electroosmotic permeability of clay soils. *Can. Geotech. J.* 34(4) (1997) 627–631. doi:10.1139/t97-28