

Accélération de la consolidation des argiles par électro-osmose : essais en centrifugeuse

K. BEDDIAR

Laboratoire des matériaux et
de structures de génie civil
(LCPC/CNRS)
Cité Descartes
2, allée Kepler
77420 Champs-sur-Marne
LMT Cachan, ENS de
Cachan/CNRS/UPMC
61, avenue
du Président-Wilson
94235 Cachan
kbeddiar@cesifr

G. RAULT

LCPC Nantes
Section mécanique des sols
et centrifugeuse
route de Bouaye, BP 4129
4341 Bouguenais Cedex
Gerard.Rault@lcpc.fr

Y. BERTHAUD

LMT Cachan, ENS de
Cachan/CNRS/UPMC
61, avenue
du Président-Wilson
94235 Cachan Cedex
berthaud@lmt.ens-cachan.fr

L. THOREL

LCPC Nantes
Section mécanique des sols
et centrifugeuse
route de Bouaye, BP 4129
4341 Bouguenais Cedex.
Gerard.Rault@lcpc.fr

A. DUPAS

Laboratoire des matériaux et
de structures de génie civil
(LCPC/CNRS)
Cité Descartes
2, allée Kepler
77420 Champs-sur-Marne

NDLR : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 1^{er} septembre 2006.

Résumé

L'électro-osmose est un phénomène physique qui correspond au mouvement de l'eau saline contenue dans un milieu poreux humide sous l'action d'un champ électrique. Ce mouvement a lieu généralement de l'anode vers la cathode. Bien que de nombreuses publications soient consacrées à ce phénomène, on constate que l'électro-osmose étudiée sur des structures à grande échelle y est peu représentée. Ceci est lié aux problèmes expérimentaux qu'engendre l'application d'un champ électrique *in situ*. Des essais d'électro-osmose ont été réalisés en centrifugeuse au Laboratoire central des ponts et chaussées (centre de Nantes), sur différentes argiles avec et sans alimentation en eau à l'anode. Les résultats obtenus en macrogravité montrent que : (i) l'électro-osmose est très efficace pour améliorer les caractéristiques mécaniques ; (ii) on peut accélérer la consolidation de différentes argiles ; (iii) la fissuration couramment observée lors des essais d'électro-osmose de laboratoire – et qui perturbe ces essais – ne survient pas dans ce cas.

Mots-clés : électro-osmose, centrifugeuse, tassement, cohésion non drainée, assèchement, consolidation, argile.

Acceleration of the clay consolidation by electroosmosis : centrifuge tests

Abstract

The electroosmosis represents the movement of saline water in a wet porous media under the action of an electric field. This movement generally takes place from the anode towards the cathode. In spite of the significant number of publications in this field, very few treat tests of electroosmosis on a large scale. This is partly related to the experimental problems generated by the application of an electric field to a soil at 1g. Tests of electroosmosis were carried out in the LCPC centrifuge. Various clays were tested with and without water supply at the anode. Our results show in particular that : (i) electroosmosis is very efficient to improve the mechanical properties of the clays (ii) an acceleration of the consolidation of saturated clays is observed and (iii) electro-osmosed samples remain uncracked contrary to what occurs in Laboratory tests.

Key words : electro-osmosis, centrifuge, settlement, undrained shear strength, drainage, consolidation, clay.

NOTATIONS

A = aire de l'échantillon (m²)
 I = intensité du courant électrique (A)
 i = densité du courant électrique (A/m²)
 k_e = perméabilité électro-osmotique (m²/V/s)
 k_h = perméabilité hydraulique intrinsèque (m²)
 L = longueur (m)
 l = hauteur de l'électrode (m)
 n = porosité (-)
 N = niveau de G (G = N g avec g = 9,81 m/s²)
 P = pression de pore (Pa)
 Q_e = débit électro-osmotique (m³/s)
 q_e = vitesse ou flux électro-osmotique (m/s)
 R = résistance électrique (Ω)
 D = diamètre de l'échantillon (m)
 V = tension électrique (V)
 v = vitesse de percolation de l'eau ou vitesse de Darcy (m/s)
 z = profondeur dans le massif (m)
 ε = constante diélectrique du milieu (Fm⁻¹)
 ε_w = constante diélectrique du liquide interstitiel (Fm⁻¹)
 λ = mobilité hydrique (m²/Pas) = k_h/η
 η = viscosité dynamique du fluide (Pa.s)
 ρ = résistivité électrique (Ω.m)
 g = accélération de la pesanteur terrestre (ms⁻²)
 r = rayon (coordonnée cylindrique) (m)
 ρ_w = masse volumique de l'eau (kg/m³)
 κ = activité électrique (S/m)
 ζ = potentiel zêta du milieu (V)

1

Introduction et contexte de l'étude

L'électro-osmose représente, de façon générale, le mouvement de l'eau saline contenue dans un milieu poreux sous l'action d'un champ électrique modéré (ordre de grandeur : 100 V/m). Ce phénomène peut s'expliquer grâce au concept de la double couche électrique (Storeman et Jonsson, 1996). Il fut découvert par Reuss en 1809 (Reuss, 1809), ce sont Helmholtz (Helmholtz, 1879) et Smoluchowski plus tard (Smoluchowski, 1921) qui en donnèrent les premières théories explicatives. Cette théorie est, à ce jour, la plus fréquemment utilisée. Par la suite, de nombreux travaux ont donné les fondements théoriques et expérimentaux des phénomènes électrocinétiques en général et de l'électro-osmose en particulier (e.g. Esrig, 1968; Casagrande, 1983; Yeung, 1994...).

L'électro-osmose est régie, à l'échelle macroscopique, par la loi de Casagrande (Casagrande, 1952):

$$Q_e = k_e A (\Delta V / \Delta L) \quad (1)$$

Avec Q_e le débit électro-osmotique volumique d'eau saline, A l'aire de l'échantillon, ΔV/ΔL le gradient de tension électrique imposé et k_e le coefficient de perméabilité électro-osmotique. Ce dernier coefficient, à l'inverse du coefficient de perméabilité intrinsèque régissant la loi de Darcy (k_h), est pratiquement constant quel que soit le type de matériau et est de l'ordre de ≈ 5 · 10⁻⁹ m²/Vs. Il peut être estimé théoriquement par l'équation connue de Helmholtz-Smoluchowski:

$$k_e = (\epsilon_w / \eta) \zeta \phi \quad (2)$$

avec ε_w la constante diélectrique du liquide interstitiel, η la viscosité dynamique, ζ le potentiel zêta du milieu et n la porosité du milieu.

Les applications de l'électro-osmose en géotechnique sont nombreuses, on peut citer les exemples suivants:

- la déshydratation des sols mous: Casagrande (Casagrande, 1949) fut le promoteur de l'utilisation de cette technique pour drainer des terrains peu consistants en vue de la réalisation de travaux de terrassements ou de fondations; ses travaux (Casagrande, 1952) ont été effectués tant en Allemagne qu'aux États-Unis. Par la suite, de nombreux travaux ont montré l'efficacité de cette technique, que ce soit en laboratoire ou sur site (e.g. Lo et al., 1991);

- l'augmentation de la capacité portante des fondations profondes (Bozozuk et Labrecque, 1967; Milligan, 1995). Ce dernier a montré que, sous certaines conditions, l'augmentation de la capacité portante peut atteindre parfois 300 % de façon irréversible: des mesures sur les pieux métalliques du pont de Big Pic à Marathon (Ontario, Canada) réalisées en 1995 ont montré que les tassements de ces derniers n'ont pas évolué depuis leur traitement par électro-osmose en 1959;

- électrodépollution des sols. Au sein d'un milieu poreux humide, l'application d'un champ électrique induit des déplacements ioniques appelés électrodifusion. L'ensemble de ces phénomènes existe lorsqu'on applique un champ électrique sur un milieu naturel et plusieurs applications peuvent en découler, notamment:

- la décontamination de sols pollués par des hydrocarbures,

- l'électromigration sélective d'ions à travers des milieux poreux très peu perméables en relation avec le stockage de déchets (e.g. Paillat et al., 2000). Cette dernière application connaît un grand regain d'intérêt depuis une vingtaine d'années. De nombreux travaux ont montré que le champ électrique permettait d'extraire du sol une grande quantité des métaux lourds (zinc, plomb, cadmium...) dans des conditions particulières, notamment de pH (e.g. Acar et al. 1993).

Néanmoins, ces applications de l'électro-osmose restent encore majoritairement à l'échelle expérimentale (en laboratoire) par manque d'optimisation des coûts et des temps de traitement associés et surtout à la non maîtrise du processus de ce phénomène. De surcroît, des auteurs (e.g. Bjerrum et al., 1967) ont signalé de nombreuses difficultés quant à l'étude de l'électro-osmose *in situ*: mise en œuvre de l'instrumentation, chute brutale – et importante – de la tension électrique au niveau de l'interface électrodes/sol. Ceci montre la prudence avec laquelle les résultats de laboratoire doivent être transposés dans la pratique, car les relations régissant les phénomènes électro-osmotiques sont extrêmement complexes.

Devant ces difficultés, la méthode expérimentale choisie pour approcher des conditions de site est d'étudier ces phénomènes sur modèles réduits centrifugés (Beddiar, 2001). L'augmentation des contraintes dans le massif due à l'application de la force centrifuge peut empêcher le matériau de fissurer et les électrodes de se détacher de l'échantillon électro-osmosé, ce qui permet de prolonger les essais sur un échantillon « homogène ». Ce sont les raisons pour lesquelles le LCPC a procédé à une campagne d'essais en centrifugeuse

d'électro-osmose et d'électro-injection⁽¹⁾ dans les argiles. La centrifugeuse du LCPC Nantes est décrite par ailleurs (Garnier *et al.*, 1999). Après un bref rappel du principe de la modélisation en centrifugeuse, nous présenterons les premiers résultats obtenus concernant l'électro-osmose dont l'objectif est d'étudier :

- la faisabilité des essais d'électro-osmose en centrifugeuse et la non fissuration de l'échantillon électro-osmosé ;
- l'évolution des propriétés hydro-mécaniques de plusieurs argiles avant, pendant et après électro-osmose avec ou sans alimentation d'eau à l'anode.

2

Lois de similitude

La modélisation en centrifugeuse est une méthode expérimentale basée sur le principe de la conservation des états de contrainte entre le prototype (ouvrage réel) et un modèle réduit soumis à une accélération : pour ce faire, on réduit les dimensions du prototype d'un facteur N et on applique au modèle réduit obtenu une accélération G égale à n fois l'accélération terrestre g (Philipps, 1869).

Les propriétés du prototype et celles du modèle (réduit) sont liées par des lois de similitude. Le passage du modèle au prototype repose donc sur la pertinence de ces lois. Dans le cas des contraintes et des déformations, par exemple, il y a généralement identité entre le modèle et le prototype, ce qui permet d'appréhender directement le comportement du massif.

L'équation proposée par Casagrande (éq. 1) est similaire aux équations classiques de Darcy, Fick, Fourier et Ohm pour décrire respectivement les écoulements hydrique, chimique, thermique et électrique. Des lois de similitude ont été déjà établies pour ces phénomènes (*e.g.* Savvidou, 1984 ; Mitchell, 1993).

La loi de Darcy permet de relier la vitesse de percolation du fluide interstitiel v (m/s), le paramètre noté λ ($m^2/Pa.s$) (rapport entre le coefficient de perméabilité intrinsèque k_h (m^2) et la viscosité dynamique du fluide η (Pa/s) et le gradient de pression hydrique (Pa/m) :

$$v = \lambda (\Delta P / \Delta L) \quad (3)$$

La loi de Casagrande peut s'écrire de la même façon :

$$q_e = k_e (\Delta V / \Delta L) \quad (4)$$

avec q_e (m/s) le flux électro-osmotique ; k_e (m^2/Vs) le coefficient de perméabilité électro-osmotique et $\Delta V / \Delta L$ (V/m) le gradient de tension électrique imposé.

Soit $f^* = (f_{\text{modèle}} / f_{\text{prototype}})$ = le facteur d'échelle.

Si le sol et le fluide interstitiel, utilisés en centrifugeuse, sont les mêmes que ceux rencontrés *in situ*, les facteurs d'échelle des paramètres suivants sont égaux à l'unité ($\epsilon^* = \eta^* = n^* = k_e^* = k_h^* = \lambda^* = \kappa^* = \zeta^* = 1$). Pour faciliter le problème, la perméabilité électro-osmotique est supposée insensible à l'accélération. Les lois d'échelle concernant la pression et la longueur étant (Phillips, 1869) : $P^* = 1$ et $L^* = 1/N$.

L'équation (3) nous fournit la loi d'échelle concernant la vitesse d'écoulement darcéenne, vérifiée par

nombreux auteurs (*e.g.* Thorel *et al.*, 2000). En centrifugeuse, pour que les différents flux (engendrés par différentes forces thermodynamiques) puissent être correctement mis à l'échelle, ils doivent avoir lieu dans le même intervalle de temps ; ceci permet d'écrire :

$$q_e^* = v^* = N \quad (5)$$

Ceci est possible uniquement si le gradient électrique imposé ($\Delta V / \Delta L$) est égal à N , autrement dit, la différence de potentiel électrique du modèle doit être égale à celle du prototype :

$$\Delta V^* = 1 \quad (6)$$

La densité du courant i (intensité électrique par unité de surface) est reliée à la différence de potentiel électrique $\Delta V / \Delta L$ par la loi d'Ohm

$$i = \kappa (\Delta V / \Delta L) \quad (7)$$

En combinant les équations (5) et (6) on arrive à $i^* = N$.

De surcroît, le facteur d'échelle de la résistance électrique $R = (1/\kappa)L/A$ est $R^* = N$, et l'intensité du courant électrique $I = i A$ est $I^* = 1/N$.

Ainsi, par exemple, sur un échantillon de kaolinite (prototype) similaire à celui étudié ici de dimensions 80 fois plus importantes que notre modèle, il faudrait appliquer une intensité électrique de l'ordre de 16 A, alors que nous nous sommes limités à quelque 100 mA pour des gradients de potentiels réalistes de l'ordre du V/cm.

Il est à noter que le temps indiqué dans cet article est relatif au modèle et non au prototype.

3

Validation expérimentale de l'électro-osmose au moyen d'un modèle centrifugé

3.1

Dispositif expérimental et procédure d'essais

Le tableau I résume les caractéristiques des essais d'électro-osmose réalisés. Nous avons étudié dans le premier essai la faisabilité de ce phénomène en centrifugeuse, tandis que dans le deuxième essai nous nous sommes intéressés à l'efficacité⁽²⁾ du traitement de l'argile par électro-osmose.

TABLEAU I Caractéristiques des essais d'électro-osmose réalisés sans alimentation en eau à l'anode.

	Essai 1	Essai 2
Limite de liquidité	46	46
Limite de plasticité	26	26
Poids volumique du matériau sec (kN/m^3)	12	12,2
Teneur en eau initiale (%)	50	49
pH initial	6	5
Conductivité électrique initiale (S/m)	0,055	0,07
Champ électrique imposé (V/cm)	0,3 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,5	1
Durée de l'essai (heures)	8	9
Niveau d'accélération appliqué (G)	10 ; 20 ; 30 ; 50	30 ; 80

(1) L'électro-injection est une application particulière de l'électro-osmose : on utilise le champ électrique pour véhiculer une solution ionique à l'intérieur d'un sol, afin d'améliorer ses caractéristiques hydro-mécaniques.

(2) Au sens d'une amélioration éventuelle des caractéristiques hydro-mécaniques.

Le matériau utilisé pour la reconstitution du massif est une kaolinite (Speswhite clay), disposée dans un conteneur cylindrique métallique de 894 mm de diamètre et de 315 mm de hauteur. Pour évaluer et comparer l'effet de l'électro-osmose, le massif de sol a été divisé en quatre secteurs égaux; deux dédiés à l'électro-osmose et les deux autres étant des secteurs neutres de référence. Le conteneur n'est pas isolé électriquement du matériau.

Dans les secteurs électro-osmosés les anodes (en laiton perforé) sont placées sur la périphérie du massif et électriquement isolées du conteneur métallique par une plaque en PVC. Un espace les sépare pour permettre le dégagement des gaz (O_2) produits par électrolyse de l'eau. La cathode consiste en un tube crépiné enveloppé dans un géotextile pour filtrer l'eau issue du débit électro-osmotique et empêcher ainsi le mouvement de l'argile. La quantité d'eau expulsée est mesurée par un capteur de niveau (flotteur associé à un LVDT).

Les figures 1 et 2 présentent l'implantation des électrodes et l'instrumentation utilisée pour ces essais.

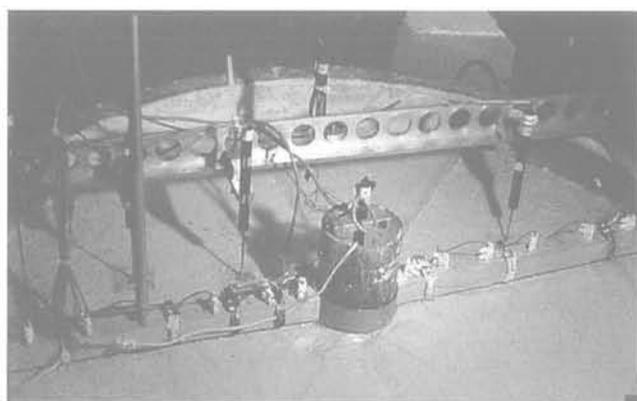


FIG. 1 Vue du massif instrumenté.
View of the experimental setup.

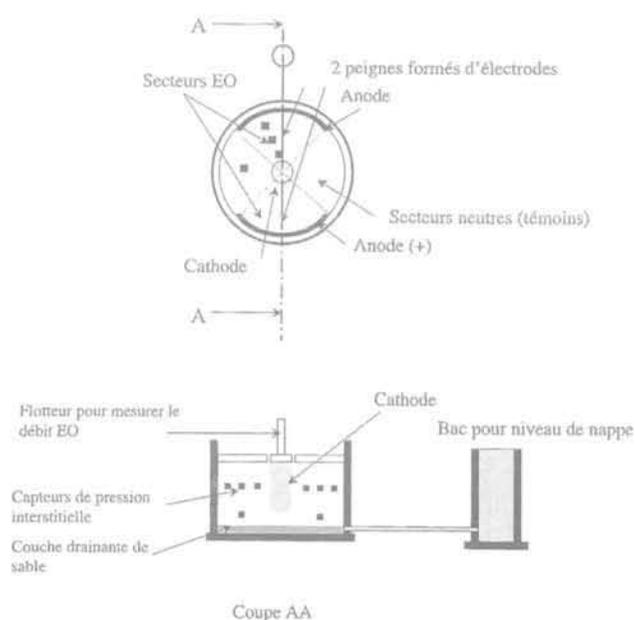


FIG. 2 Schéma simplifié du dispositif expérimental
Simplified sketch of the experimental setup.

Chaque secteur est instrumenté par :

- trois capteurs de tassement de sol (LVDT) placés en surface et à différents endroits du secteur (proche de l'anode, à mi-distance de l'anode et de la cathode et proche de la cathode);
- quatre capteurs de pression interstitielle, placés à deux niveaux à l'intérieur du massif dont trois à la cote - 60 mm et un à la cote - 140 mm par rapport à la surface libre de l'argile. Ces cotes ont une incertitude de ± 10 mm (en raison des difficultés de mise en place des capteurs et des imprécisions sur les mesures des différentes épaisseurs (lit de sable, argile));
- un « peigne » multi-électrodes métalliques introduit dans le massif pour mesurer localement la tension électrique.

En plus de ces mesures, un pénétromètre embarqué dans la nacelle permet de mesurer en vol la résistance de pointe et par corrélation la cohésion non drainée du sol (Garnier *et al.*, 1999).

Des profils de teneurs en eau massiques initiales et finales ont été déterminés par prélèvement.

On peut décrire schématiquement le déroulement de chaque essai de la façon suivante : une fois que le niveau d'accélération désiré est atteint, le processus de consolidation sous poids propre se poursuit pendant quelques heures en mesurant la dissipation des pressions interstitielles et les tassements de surface. Ensuite, la procédure d'électro-osmose proprement dite est démarrée par application du champ électrique.

3.2

Résultats et discussion

La variation du débit électro-osmotique enregistré à la cathode au début de l'essai 1 en fonction des champs électriques imposés est conforme à la loi de Casagrande, c'est-à-dire qu'à un niveau d'accélération donné, la masse d'eau recueillie par électro-osmose augmente avec la tension électrique appliquée (Fig. 3). Il est à noter que les changements de pente sur cette figure sont quasi instantanés (vitesse de scrutation de une acquisition par minute) et parfaitement corrélés aux changements de tension électrique appliquée.

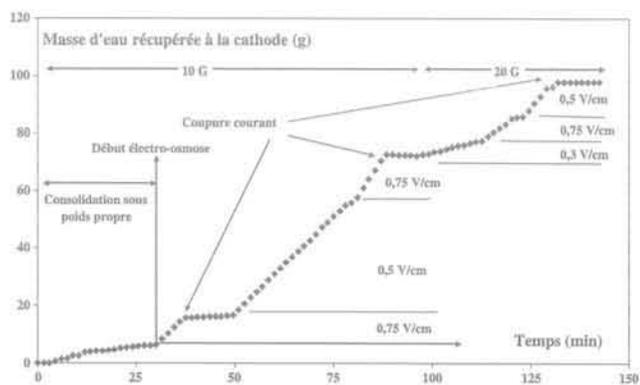


FIG. 3 Masse d'eau extraite à la cathode par électro-osmose à différents niveaux de G et de champ électrique imposés.

Water discharge by electro-osmosis vs time at different G-levels and imposed electric field.

Ces variations de la masse d'eau extraite ont permis, à chaque palier d'accélération, d'estimer le débit électro-osmotique à partir duquel on obtient le coefficient de perméabilité électro-osmotique moyen en fonction du niveau d'accélération imposé (Fig. 4). Les valeurs obtenues varient entre 3,3 et $7.10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$; elles demeurent cependant dans le même ordre de grandeur, tandis que l'accélération a été multipliée par 50. Elles sont très proches de la valeur moyenne proposée par Casagrande. En outre, il semblerait que ces valeurs augmentent avec ce niveau d'accélération (contrairement à la perméabilité hydraulique). Cette légère augmentation de k_e peut être expliquée par l'augmentation du potentiel ξ à l'échelle microscopique due aux rapprochements entre les particules d'argile sous l'effet de l'accélération. Olsen (1972) trouve des résultats similaires en cellule triaxiale, i.e. la perméabilité électro-osmotique tend à augmenter avec la « contrainte verticale » imposée.

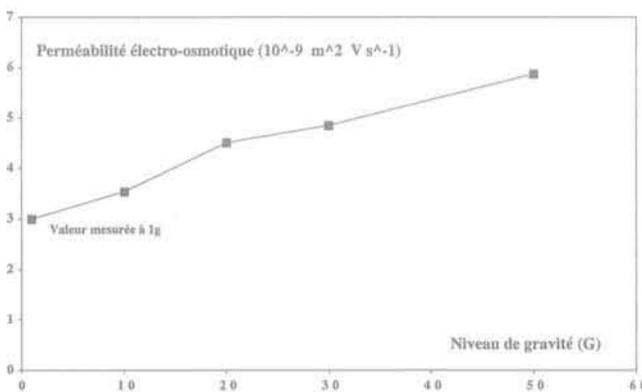


FIG. 4 Variation du coefficient de Casagrande (perméabilité électro-osmotique) en fonction du niveau de G imposé. Electro-osmotic permeability vs the imposed G-levels.

Les essais, réalisés selon la procédure du paragraphe 3.1, permettent d'étudier (Fig. 5) la variation de pression interstitielle enregistrée respectivement près (capteur à environ 50 mm) de l'anode et de la cathode dans le secteur électro-osmosé et dans le secteur neutre. Ce secteur neutre est soumis à la centrifugation, mais pas au champ électrique, compte tenu du dispositif expérimental. Que l'on soit dans le secteur électro-osmosé ou dans le secteur neutre, on observe deux évolutions distinctes de la pression interstitielle.

1) Lors de la montée en accélération, les contraintes (et la pression interstitielle) augmentent dans le massif. L'eau ne peut pas s'évacuer immédiatement; il n'y a pratiquement pas de tassement, l'augmentation de la contrainte étant « reprise » uniquement par l'eau (processus classique de la consolidation). L'augmentation de la pression interstitielle est de 23 kPa, ce qui est du même ordre de grandeur que l'augmentation de contrainte totale liée à l'accélération. En effet, dans ce cas, on obtient, sous réserve de pouvoir appliquer la notion de contrainte effective, une valeur égale à : niveau d'accélération hauteur * poids volumique = $30 \times 0,06 \cdot 17 = 30 \text{ kPa} \pm 5 \text{ kPa}$. L'incertitude est liée au positionnement des capteurs de pression (et à la variation possible de position en cours d'essai) principalement.

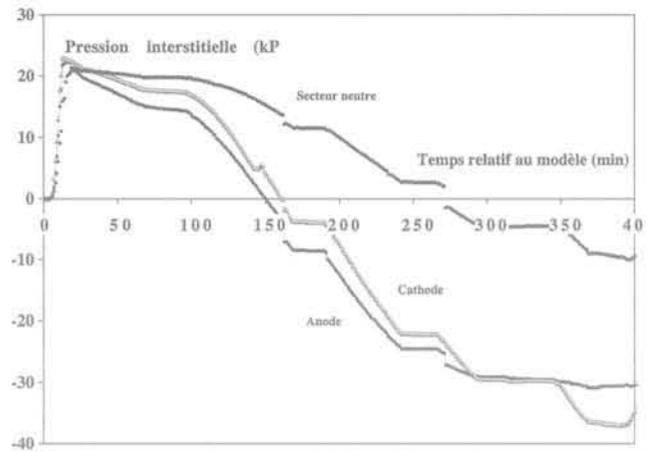


FIG. 5 Exemple de variation de la pression interstitielle à 30g dans les secteurs neutre et électro-osmosé; sondes de pression à une profondeur de 7 cm. Example of pore pressures variations at 30g in electro-osmosed and neutral sectors. Pore pressure transducers at a depth of 7 cm.

2) Une fois le palier d'accélération centrifuge atteint, la dissipation de la pression interstitielle se produit de manière plus ou moins importante, selon que l'on se trouve dans le secteur neutre ou électro-osmosé :

– dans le secteur neutre, on retrouve la consolidation classique des sols fins saturés sous l'effet d'un chargement (ici augmentation du poids). La valeur atteinte par la pression est donnée à l'équilibre: $\rho_w g z$ où ρ_w est la masse volumique de l'eau, g l'accélération et z la profondeur des sondes de pression. On obtient, dans ce cas, la valeur de 18 kPa ce qui est cohérent avec la valeur obtenue en fin d'essai dans le secteur neutre;

– dans le secteur électro-osmosé: la dissipation est due à la fois à la consolidation et au champ électrique; elle est donc plus importante que dans le cas précédent.

On constate que les courbes sont semblables près de l'anode et de la cathode. Dans la géométrie cylindrique (cas étudié ici), le gradient de potentiel électrique est plus fort à proximité de la cathode, comme le montre bien la figure 6. Étant donné que le débit électro-osmotique est proportionnel au champ électrique local, on peut imaginer que, par conséquence, il y a une dissipation importante de la pression dans cette zone (Esrig, 1968). On peut remarquer que les pressions interstitielles deviennent – sur la figure 5 – négatives. Cela est dû au fait que :

- les pressions mesurées sont des variations par rapport à l'état d'équilibre en début d'essai;
- l'état initial de pression interstitielle (due au compactage) n'est pas connu.

Il est à signaler que les allures des courbes de tassement (Fig. 6) sont similaires à celles habituellement rencontrées dans l'étude des problèmes de consolidation en mécanique des sols. Elles montrent une évolution concomitante en cohérence avec celles des pressions de la figure 5. De surcroît, ces tassements sont plus importants dans le secteur électro-osmosé (notamment aux électrodes) que dans le secteur neutre.

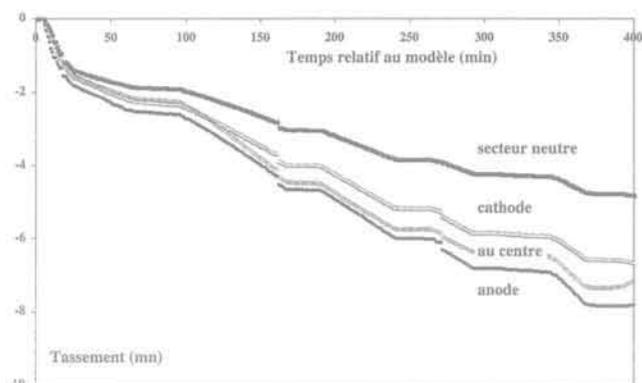


FIG. 6 Exemple de tassement au cours d'un essai d'électro osmose.
Example of settlement.

L'évolution de la tension électrique est montrée sur la figure 7. Elle augmente au cours du temps suite probablement à la désaturation et l'assèchement progressif du sol. Il est tout à fait possible que ces mesures soient entachées de quelques erreurs dues à la tension de pile pouvant se superposer à la vraie valeur de tension suite à la corrosion des électrodes métalliques employées ; cette tension de pile est généralement de l'ordre de 1 V. Cependant, le profil théorique de la tension électrique donnée par la relation,

$$V(r) = (i/2 \kappa l) \ln (2r/D) \quad (8)$$

est en accord avec les mesures de tensions initiales. avec :

i la densité du courant électrique

κ la conductivité électrique

l la hauteur de l'électrode

D le diamètre de l'échantillon.

Afin de se rendre compte de l'efficacité du traitement par électro-osmose, nous avons effectué des mesures de teneur en eau au début et en fin d'expérience (donc sur le sol ayant subi à la fois un cycle à 30 g et un autre à 80 g), suivant des profils horizontaux dans le massif (Fig. 8). On constate que dans le secteur électro-osmosé la teneur en eau en fin d'expérience a diminué d'environ 28 % à l'anode, 12 % au centre et de 23 % à la cathode pour un temps de traitement proche de 400 minutes. Dans le secteur neutre, cette teneur en eau a chuté seulement de 7 %, sous l'effet de la seule consolidation. Proche de l'anode, non alimentée en eau, il y a une forte diminution de la teneur en eau. Des expériences similaires en laboratoire à 1 g montrent qu'il est tout à fait possible de diminuer la teneur en eau par électro-osmose dans le compartiment anodique jusqu'à la limite de plasticité du matériau (Beddiar *et al.*, 2002), donc on peut imaginer qu'en poursuivant l'essai on pourrait atteindre au moins cette limite. Il est important de rappeler que, dans un processus de consolidation électro-osmotique, le durcissement (ou la cimentation entre les grains du sol) à l'anode est la conséquence de : (i) la consolidation (au sens diminution de la teneur en eau) ; (ii) des modifications électrochimiques dans cette zone (baisse du pH) (Beddiar *et al.*, 2002). A la cathode, par contre, il semble que le durcissement soit dû à la forte densité du courant régnant dans cette zone. Enfin, si l'on se réfère aux travaux d'Esrig et Gemeinhardt (1967) et Bjerrum *et al.* (1967), ces modifications au niveau des électrodes produiraient des changements importants dans les limites d'Atterberg (ou de consistance) du matériau.

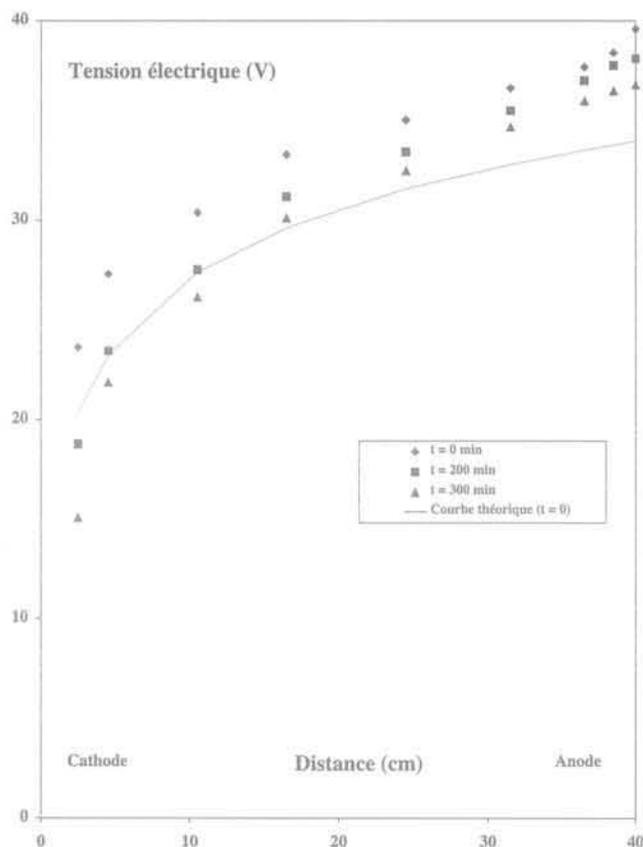


FIG. 7 Courbes de la tension électrique en fonction du temps à différents instants (champ électrique imposé = 1 V/cm).
Electric potential vs time et différent G-levels (imposed electric field = 1 V/cm).

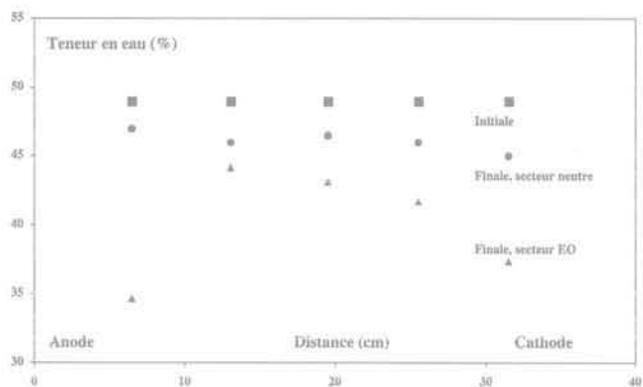


FIG. 8 Distribution de la teneur en eau massique.
Water content distribution.

Trois profils pénétrométriques ont été réalisés avant et après l'essai d'électro-osmose en centrifugeuse dans différents secteurs (au milieu de ces derniers). Ces mesures ne sont qu'indicatives, car le pénétromètre a été dimensionné pour caractériser des matériaux plus raides. On constate (Fig. 9) que dans le secteur électro-osmosé la cohésion non drainée du matériau a pratiquement doublé. Ceci confirme l'efficacité du traitement électro-osmotique, mais mériterait des mesures complémentaires afin de mieux caractériser l'amélioration des propriétés mécaniques des sols électro-osmosés.

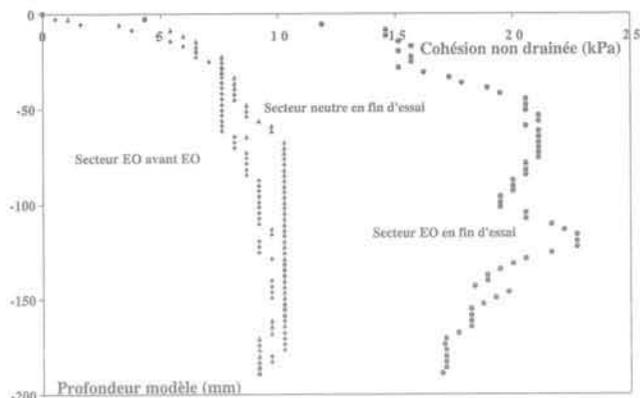


FIG. 9 Profil de la cohésion non drainée du matériau avant et après traitement par électro-osmose à 7 cm du bord extérieur. Undrained shear strength profiles in a soil sample before and after electroosmosis processing at 7 cm from the exterior boundary.

3.3

Conclusion partielle

Ces premiers essais d'électro-osmose en centrifugeuse ont été entrepris sans alimentation en eau à l'anode; les résultats obtenus permettent de dégager les conclusions suivantes:

- l'efficacité de l'électro-osmose en centrifugeuse est démontrée: son application à des essais particuliers peut être envisagée;

- nous n'avons pas remarqué de fissures pendant nos essais, contrairement à ce qui se passe *in situ* (Bjerrum *et al.*, 1967). Cela permettait de prolonger la durée des essais tout en travaillant sur un échantillon homogène et non fissuré;

- la loi de Casagrande (Fig. 4) est vérifiée à grande échelle, et le coefficient de Casagrande semble croître avec le niveau de G (doublement entre 1 g et 50 g), ce qui est conforme à des observations faites par Olsen (rapprochement à l'échelle microscopique des feuillets d'argile);

- les différentes mesures réalisées (pression hydraulique, tassement, tension électrique, cohésion non drainée...) sont cohérentes et montrent l'intérêt d'utiliser l'électro-osmose en vue d'accélérer les processus de consolidation et d'assèchement des sols fins.

4

Essais comparatifs sur trois argiles

4.1

Dispositif expérimental et procédure d'essais

Les argiles utilisées sont: une illite, une bentonite et une kaolinite placées dans des conteneurs cylindriques (hauteur = 300 mm, diamètre = 280 mm) en polypropylène. Pour chaque matériau, un conteneur de référence (non électro osmosé a été ajouté). Ce matériau offre à la fois une bonne isolation électrique et une bonne résistance mécanique. Les figures 10 et 11 montrent le dispositif expérimental utilisé ainsi que la disposition de ces conteneurs.

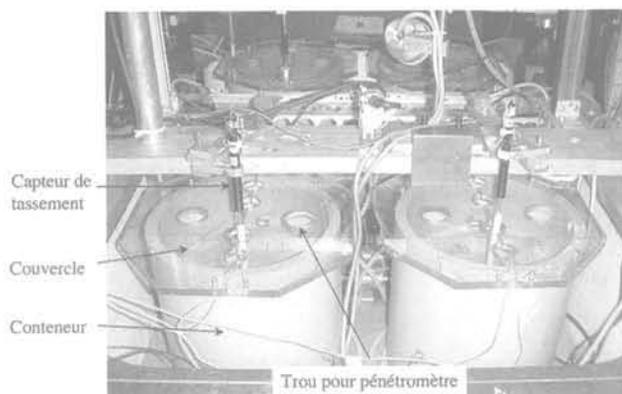


FIG. 10 Vue du dispositif expérimental. Experimental configuration.

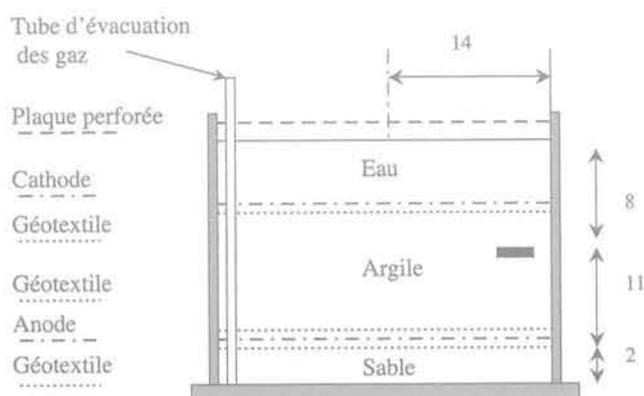


FIG. 11 Coupe d'un conteneur utilisé pour essais d'électro-osmose: le couvercle, équipé de réservations, permet la réalisation de profils pénétrométriques en vol. Elevation view of a container used for electroosmosis tests: the cover with holes allows to perform cone profiles during the flight.

Dans les conteneurs électro-osmosés, les électrodes sont en fibres de carbone, la cathode est placée dans la partie supérieure de l'échantillon et l'anode dans la partie inférieure. Ainsi, la force électro-osmotique (déplaçant l'eau vers la cathode) est opposée à la force centrifuge.

Le choix des électrodes en tissu de carbone a été retenu après plusieurs tests, notamment pour sa facilité de mise en œuvre. De plus, il s'avère bon conducteur électrique et ne se corrode pratiquement pas (Beddiar *et al.*, 2002).

Trois argiles ont été utilisées: kaolinite Speswhite (argile inactive chimiquement), illite (argile moyennement active) et une bentonite (argile active). Les échantillons ont été préparés en mélangeant les argiles sous forme de poudres à l'eau du robinet. Le tableau II résume les propriétés de ces argiles: la capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée par un essai au bleu de méthylène (Tran, 1977). La hauteur du sol dans chaque conteneur est de l'ordre de 180 mm.

L'essai a été réalisé à 80 g. Deux intensités électriques modérées ont été imposées: 200 mA et 300 mA, afin de minimiser à la fois les pertes de l'énergie électrique par effet Joule et les effets prononcés de l'électrolyse de l'eau (qui provoquent des modifications de

TABLEAU II

Caractéristiques des argiles utilisées.
 Characteristics of clays used in this study.

	Kaolinite	Illite	Bentonite
Teneur en eau massique initiale (%)	112	169	262
pH du sol initial	6	5,5	6
Cations échangeables	Na ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺
CEC (meq/100 g)	5	45	87
Conductivité électrique initiale (mS/m)	66	65	6

pH) au niveau des électrodes. Afin d'éviter l'accumulation des gaz dégagés aux électrodes (O₂ à l'anode et H₂ à la cathode), un tube crépiné a été mis en place au niveau de chaque électrode. Une plaque de Plexiglas recouvre le modèle pour limiter l'évaporation et l'assèchement de la surface du massif du sol. Des réservations dans ce couvercle sont néanmoins prévues et autorisent la réalisation des essais pénétrométriques pendant la rotation.

Chaque échantillon a été instrumenté par un capteur de tassement (LVDT) isolé électriquement (tige du capteur en téflon) et une sonde de pression interstitielle ; cette sonde est placée dans le massif via un orifice situé à 11 cm de l'électrode inférieure. L'étanchéité est assurée par une presse-étoupe au passage du fil à travers la paroi. Le capteur lui-même peut éventuellement changer de cote sous l'effet du contraste de densité et de raideur du capteur et du sol.

Chaque échantillon est alimenté en permanence en eau à l'anode sous charge hydraulique constante (connexion à un récipient en Plexiglas). La procédure expérimentale suivie est la suivante : une fois le niveau d'accélération atteint (80 g), on laisse la consolidation se poursuivre pendant environ 3 heures (en toute rigueur, il aurait fallu attendre plus longtemps), mais pour des raisons de sécurité, l'essai s'est déroulé uniquement pendant la journée, ce qui a limité cette étape). Ensuite, on commence l'essai d'électro-osmose proprement-dit en appliquant 200 mA (50 V/m) pendant 2 heures et 300 mA (75 V/m) pendant environ 1 heure.

4.2

Résultats et discussions

La figure 12 montre une comparaison entre les tassements enregistrés dans les massifs de kaolinite neutres et électro-osmosés.

On peut constater une nette accélération du tassement dans le massif électro-osmosé par rapport au massif neutre. Ceci est d'autant plus important que l'intensité électrique est grande. De même, la figure 13 présente une comparaison entre les variations de pressions interstitielles (entre la valeur mesurée en vol et la valeur initiale prise avant l'essai) dans le secteur électro-osmosé et le secteur neutre. Il apparaît que cette pression se dissipe un peu plus rapidement dans le secteur concerné par l'électro-osmose, car la vitesse locale de l'eau se trouve nettement accélérée par le champ électrique. Les évolutions des tassements sont en accord avec les pressions interstitielles enregistrées. Nous avons obtenu un comportement similaire, mais moindre, dans les échantillons d'illite et de bentonite (Beddiar *et al.*, 2002).

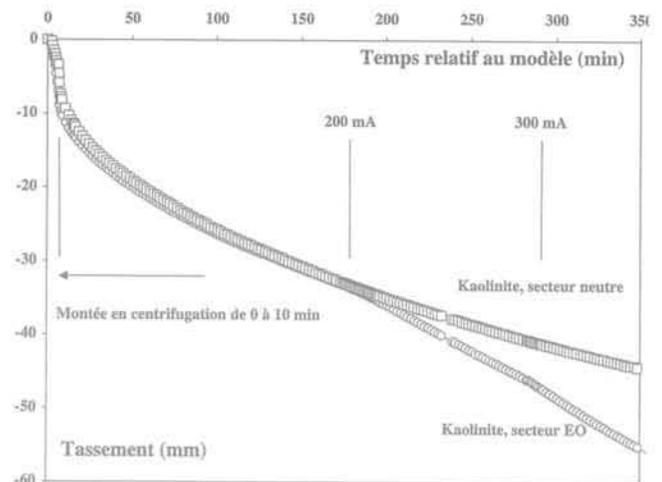


FIG. 12 Comparaison entre les tassements dans les massifs de kaolinite neutre et électro-osmosé à 80 g.
 Comparison between settlements of neutral and electroosmosed kaolinite at 80 g.

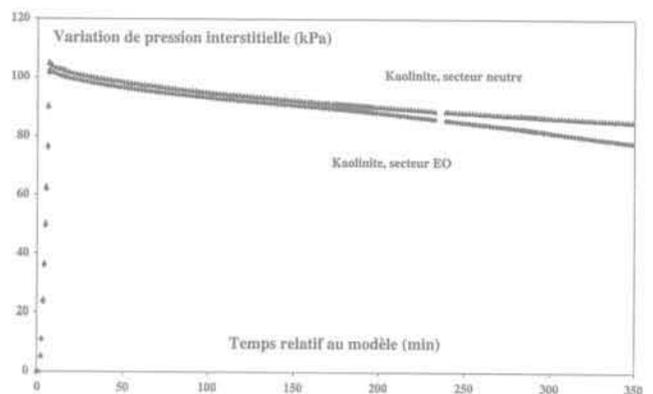


FIG. 13 Comparaison entre les variations de pressions interstitielles mesurées dans les massifs de kaolinite neutre et électro-osmosé à 80 g.
 Comparison between the variation of pore pressure in the neutral and electroosmosed kaolinite at 80 g.

Afin d'illustrer l'influence de la nature de l'argile sur l'efficacité électro-osmotique, on montre, sur la figure 14, la comparaison entre les tassements relatifs (différence entre le tassement dans les massifs électro-osmosé et neutre) des trois argiles. Les tassements et, par voie de conséquence, l'efficacité électro-osmotique croissent dans l'ordre suivant : kaolinite, illite et bentonite. Ce résultat confirme les considérations thermodynamiques établies par Gray et Mitchell (1967), selon lesquelles l'électro-osmose diminue avec l'activité chimique de l'argile. En effet, selon ces auteurs, les particules d'une argile active (*i.e.* CEC grand), négativement chargées (dans des conditions habituelles notamment de pH) à l'échelle microscopique, attirent vers elles un maximum de cations et repoussent les anions disponibles dans la double couche électrique. Ceci diminue le potentiel ξ du milieu et donc l'écoulement électro-osmotique qui lui est proportionnel (cf. eq. 2).

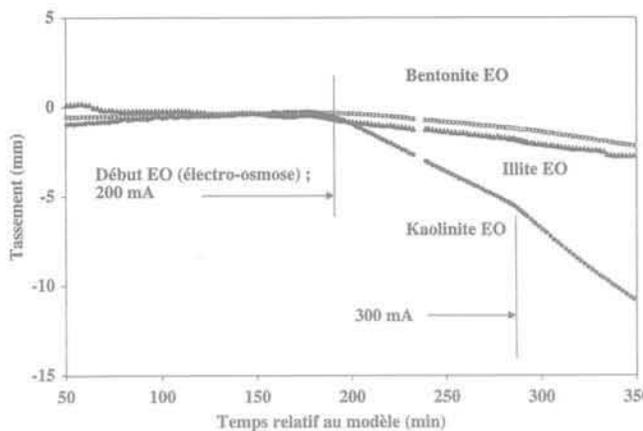


FIG. 14 Comparaison entre les tassements dans les différentes argiles électroosmosées à 80 g. Comparison between settlements of different clays at 80 g.

Les profils verticaux de teneur en eau, réalisés en fin d'essai dans les massifs neutre et électro-osmosé (Fig. 15), indiquent, par rapport aux valeurs initiales, une baisse de l'ordre de 10 % à l'anode dans le massif de bentonite électro-osmosé et de 20 % dans celui de kaolinite pour une « durée de vol » d'environ 3 heures. Cette baisse est moins significative en haut du massif (au voisinage de la cathode) que vers le bas (au voisinage de l'anode). Ceci est probablement dû aux deux facteurs suivants : (i) les pH élevés mesurés durant l'essai qui ont pour effet d'altérer la cohésion entre les particules dans cette zone (Esrig et Gemeinhardt, 1967) et (ii) la présence du surnageant durant l'essai dans la partie supérieure du massif. La baisse de conductivité électrique mesurée pendant l'essai confirme cette baisse de teneur en eau.

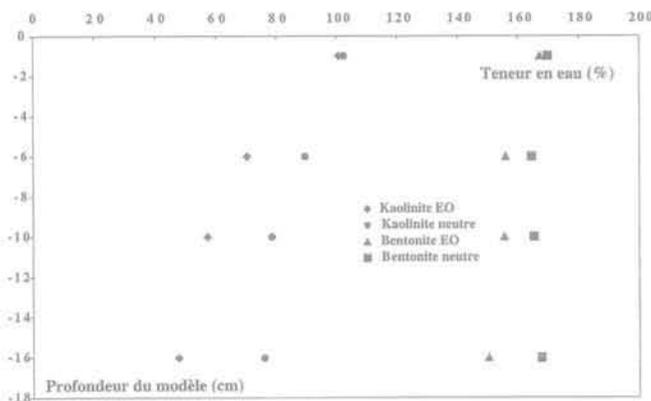


FIG. 15 Distribution de la teneur en eau massique des différentes argiles en fin d'essai. Water content distribution of clays at the end of the test.

4.3

Conclusion partielle

Différentes argiles ont été électro-osmosées pour étudier l'influence de la nature d'argile sur l'électro-osmose. Les résultats montrent qu'il est tout à fait possible d'accélérer de façon significative la consolidation des argiles saturées par champ électrique. Néanmoins,

pour obtenir des résultats satisfaisants, des précautions particulières doivent être prises en compte, parmi elles : (i) application de champs électriques modérés (de l'ordre du V/cm) pour limiter les effets Joule ; (ii) utilisation d'électrodes non polarisables (tissu de fibres de carbone par exemple) ; (iii) mise en place d'un système permettant aux gaz produits aux électrodes de s'échapper de façon à ne pas perturber l'essai.

Les résultats obtenus nous permettent de dire que :
 – l'électro-osmose fonctionne en centrifugeuse pour différents type d'argile et semble plus efficace, toutes quantités égales par ailleurs, dans les argiles peu actives chimiquement (CEC faible) ;
 – la force électrique reste supérieure à la force centrifuge et ceci bien que l'accélération ait été de 80 g et les gradients de potentiel faibles (inférieurs à 1 V/cm).

5

Conclusion et perspectives

Nous avons présenté et analysé les premiers résultats obtenus concernant l'étude du phénomène d'électro-osmose en centrifugeuse. Cette étude, s'inscrivant dans le cadre d'une campagne d'essais réalisée conjointement avec le LCPC de Nantes, a pour objectif principal de comprendre le comportement à grande échelle des sols soumis à un champ électrique.

Durant ces premiers essais, nous avons eu à résoudre un certain nombre de problèmes : (i) conception des électrodes ; (ii) mesure en vol du débit électro-osmotique ; (iii) isolation électrique de l'échantillon du reste du dispositif ; (iv) réalisation en vol d'essais pénétrométrique. Malgré ces difficultés, nos résultats montrent que l'électro-osmose est une technique alternative très intéressante pour assécher rapidement les sols fins et améliorer leurs propriétés mécaniques. Grâce à cette technique, on peut également accélérer la consolidation des argiles saturées. De ce fait, une baisse maîtrisée et localisée de teneur en eau d'une argile est tout à fait possible. Pour une diminution de teneur en eau plus homogène, on peut retenir la technique d'inversion du sens d'application du champ électrique (electrode reversal) (e.g. Lefebvre et Pavate, 1993).

Les lois de similitude, proposées dans cette communication, constituent une première étape afin de pouvoir décrire le comportement d'un ouvrage réel électro-osmosé à partir d'un modèle électro-osmosé centrifugé. Des essais en centrifugeuse, basés sur le principe de la modélisation à différentes échelles, prévus prochainement au LCPC, tenteront de valider ces lois de similitude dans le cas de la consolidation.

Outre les essais prévus pour étudier les lois d'échelle, des essais complémentaires d'électro-osmose sont prévus afin : (i) d'évaluer l'utilisation de l'électro-osmose et de l'électro-injection pour améliorer la capacité portante des pieux et (ii) d'étudier plus en détail la consolidation et, également, de voir l'influence des paramètres physico-chimiques sur l'efficacité électro-osmotique, le but étant d'optimiser l'ensemble des paramètres qui régissent ce phénomène en vue d'applications *in situ*.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier très vivement toute l'équipe technique de la centrifugeuse du LCPC pour leur aide et assistance.

- Acar Y.B., Gale R.J., Alshawabkeh A.N. – Principles of electrokinetic remediation. *Environ. Sci. Technol.*, 27, 13, 1993, p. 2638-2647.
- Beddiar K. – Sur certains aspects des couplages dans les milieux poreux électrisés. Application à l'électro-osmose dans les argiles. Thèse de l'École nationale des ponts et chaussées, 2001, 212 p.
- Beddiar K., Thorel L., Rault G., Berthaud Y. – Electro-osmosis on clay in 1D-centrifuge test. In *Physical Modelling in Geotechnics*. ICPMG02, Philipps and Popescu Eds., 2002, p. 337-342.
- Bjerrum L., Moum J., Eide O. – Application of electro-osmosis on a foundation problem in Norwegian quick clay. *Geotechnique*, 17, 3, 1967, p. 214-235.
- Bozozuk M., Labrecque A. – Downdrag measurements of 270-ft composite piles. *American Society for Testing and Materials*. Special Technical Publication n° 444, 1969, p. 15-40.
- Casagrande L. – Electro-osmosis in soils. *Geotechnique*, 1, 3, 1949, p. 159-177.
- Casagrande L. – Electro-osmosis stabilization of soils. *Journal of the BSCE*, 39, 1952, p. 51-83.
- Casagrande L. – Stabilization of soils by means of electro-osmosis: state of the art. *J. Boston Soc. Civ. Eng. Sect.*, ASCE, 69, 2, 1963, p. 255-561.
- Esrig M.I. – Pore pressures, consolidation and electrokinetics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*. Division ASCE, 94, SM4, 1968, p. 899-921.
- Esrig M.I., Gemeinhardt J.P. – Electrokinetic stabilization of an Illitic clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*. Division ASCE, 93, SM3, 1967, p. 234-245.
- Garnier J., Derckx F., Cottineau L.-M., Rault G. – Études géotechniques sur modèles centrifugés. Évolution des matériels et des techniques expérimentales. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 223, 1999, p. 27-50.
- Gray D.H., Mitchell J.K. – Fundamental aspects of electro-osmosis in soils. *J. of Soil Mech. and Found.* Division ASCE, 93, 1967, p. 209-236.
- Gray D.H. – Prevention of moisture rise in capillary systems by electrical short circuiting. *Nature*, 223, 1969, p. 371-374.
- Helmholtz H. – Wiedemanns Annalen d. Physik, vol. 7, 1879, p. 137.
- Lefebvre G., Pavate T.V. – A study of electro-osmotic consolidation of soft clays. *Proc. 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St Louis, Missouri, paper n° 7.44, 1993, p. 1131-1137.
- Lo K.Y., Incullet I.I., Ho K.S. – Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28, 1991, p. 62-73.
- Milligan V. – First application of electro-osmosis to improve friction pile capacity three decades later. *Proc. Instr. Engrs, Geotechnique*, 113, 1995, p. 112-116.
- Mitchell J. K. – *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons, 2nd ed., 1993.
- Olsen H.W. – Liquid movement through kaolinite under hydraulic, electric and osmotic gradients. *The Am. Ass. of Petr. Geo. Bull.*, 56, 1972, p. 2022-2028.
- Paillat T., Moreau E., Grimaud P.O., Touchard G. – Electrokinetic Phenomena in porous media applied to soil decontamination. *IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7, 5, 2000, p. 693-704.
- Phillips E. – De l'équilibre des solides élastiques. *CRAS*, 68, 1869.
- Reuss F.F. – Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique. *Mémoire Soc. impériale nat. de Moscou*, 2, 1809, p. 327-337.
- Savvidou C. – *Effects of a heat source in saturated clay*. PhD Cambridge University, 1984, 147 p.
- Smoluchowski M. – *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus*. Barth, Leipzig, vol. II, 1921, 366 p.
- Söderman L.G., Milligan L. – Capacity of friction piles in varved clay increased by electro-osmosis. *Proc. 5th annu. Meet. Highw. Res.*, 1961, p. 589-599.
- Storeman O., Jonsson B. – Electro-osmosis: velocity profiles in different geometries with both temporal and spatial resolution. *J. Phy. Chem.*, 105, 23, 1966, p. 780-789.
- Thorel L., Noblet S., Garnier J., Bisson A. – Capillary rise and drainage flow through a centrifuged porous medium. *Proc. Int. Symp. Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, 15-17 mai 2000, p. 251-258.
- Tran N.L. – Nouvel essai d'identification des sols: l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de liaison des laboratoires du LCPC*, n° 88, 1977, p. 136-137.
- Yeung A.T. – Electrokinetic flow processes in porous media and their applications. In *Advances in Porous Media*, Corapcioglu ed. 2, 1994, p. 309-395.