APPLICATION DE L'ÉLECTROOSMOSE A L'EXÉCUTION DE CERTAINS TRAVAUX EN TERRAINS AQUIFÈRES

THE APPLICATION OF ELECTRO-OSMOSIS FOR THE EXECUTION OF CERTAIN WORKS ON WATER-BEARING SOILS

English Synopsis p. 336

par G. REMENIERAS

Adjoint au Chef du Service des Etudes et Recherches hydrauliques
d'Electricité de France

Dès 1936 des essais avaient été effectués en Allemagne en vue d'utiliser les phénomènes d'électroosmose pour stabiliser les talus de fouilles ou de tranchées exécutées dans des terrains aquifères à grains très fins (au-dessous de 1/50^e de mm.) à peu près impossibles à drainer par les procédés classiques. La méthode consiste à accélérer la filtration en ajoutant à l'action de la charge hydraulique « naturelle » celle de la « charge ou pression électroosmotique » réalisée en faisant circuler un courant électrique continu à travers le terrain à drainer. Cette méthode a été utilisée avec succès depuis 1939 pour l'exécution de travaux importants qui ont été décrits notamment dans une étude du Department of Scientific and Industrial Research intitulée « The application of electro-osmosis to practical problems in foundations and earthworks » (Technical Paper n° 30 Londres 1947).

Des essais systématiques de Laboratoire ont été effectués récemment par le Laboratoire de Mécanique des sols de l'Ecole Polytechnique de Zurich; un premier compte rendu de ces travaux a paru sous la signature de MM. W. SCHAAD et R. HAEFELI dans la «Schweizerische Bauzeitung» (N°s 16, 17 et 18 Avril-Mai 1947).

A la lumière de ces publications, il nous a paru intéressant de résumer l'état actuel de cette question qui semble pouvoir trouver en France plusieurs applications.

I. — RAPPEL DU MECANISME DES PHENOMENES D'ELECTROOSMOSE ET D'ELECTROPHORESE.

a) Phénomènes généraux :

1) Si l'on partage une solution aqueuse en deux régions à l'aide d'un diaphragme poreux et si l'on établit une différence de potentiel entre

ces deux régions, on constate qu'en général le liquide se met à filtrer à travers le diaphragme. Ce transport de liquide par voie électrique à travers la matière poreuse constitue l'**électroosmose**; il a été décrit pour la première fois par REUSS en 1808.

2) Quand on établit un champ électrique entre deux points d'un liquide contenant des particules, colloïdales ou non, en suspension, par exemple en plongeant dans le liquide deux électrodes reliées aux bornes d'un générateur électrique, on voit les particules se mettre en mouvement soit dans le sens du champ en allant vers la cathode, soit en sens inverse en allant vers l'anode. Ce phénomène qui est général et se produit dans l'essence de térébenthine comme dans l'eau, avec des bulles gazeuses comme avec des poussières solides ou des gouttelettes liquides émulsionnées (1) s'appelle l'**électrophorèse**.

3) En faisant agir une différence de pression entre deux masses liquides séparées par un diaphragme, ce qui entraîne une filtration du liquide à travers le diaphragme, on provoque l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux parties du liquide (2). De même, si en l'absence d'un champ de petites particules tombent dans un liquide, une différence de potentiel peut prendre naissance entre les couches supérieures et les couches inférieures du liquide.

(1) Le dépoussiérage électrique des gaz et des fumées (procédé Cottrel) peut être considéré comme une application particulière de l'électrophorèse.

(2) On peut rattacher au même phénomène l'électrisation des hydrocarbures liquides s'écoulant dans des tuyaux sur lesquels apparaissent également des charges considérables si leur isolement électrique est suffisant; il peut en résulter de fortes étincelles susceptibles d'entraîner l'explosion ou l'incendie des hydrocarbures, aussi une réglementation spéciale prévoit-elle la mise à la terre soignée des tuyauteries et réservoirs de ce genre.

b) Les théories :

1. — L'hypothèse de la couche double électrique

On interprète les phénomènes de l'électrophorèse et de l'électroosmose à partir de l'hypothèse de « la couche double » formulée pour la première fois par QUINCKE en 1861 ; elle consiste à admettre, avant toute action électrique extérieure, une électrisation spontanée au contact d'un solide et d'un liquide. La surface du solide se charge d'une certaine couche électrique, une couche électrique de signe opposé apparaissant dans le liquide, la surface de contact solide-liquide joue en quelque sorte le rôle du diélectrique d'un condensateur classique.

Dans le cas de l'électrophorèse, le transport des particules en suspension est dû à l'action, sur les charges électriques portées par lesdites particules, du champ électrique créé par le passage du courant ; si par exemple la particule est chargée négativement par rapport au liquide, elle remontera le courant pour aller se déposer sur l'anode (+) ; si elle est chargée positivement elle se déplacera en sens inverse. Dans l'électroosmose, la charge électrique d'une particule du liquide se déplace par le même mécanisme dans le sens des lignes de force en entraînant ladite particule et aussi, par frottement, les particules voisines.

Ainsi, le mécanisme de l'électroosmose et de l'électrophorèse (qui impliquent toutes deux le même déplacement relatif du liquide par rapport au solide) s'apparente à celui de l'électrolyse selon la théorie d'ARRHENIUS ; mais tandis que dans ce dernier cas le signe de l'ion, et par suite le sens de son déplacement, est bien déterminé par sa fonction chimique (les ions métalliques sont chargés positivement et se rendent au pôle négatif ; les ions métalloïdiques sont chargés négativement et vont au pôle positif) dans l'osmose électrique la charge de la particule n'est pas connue a priori.

En 1898 COHEN crut avoir trouvé une règle simple permettant d'indiquer à l'avance le signe de la particule, antérieurement à toute action électrique extérieure ; selon cette règle, un corps de forte constante diélectrique se charge positivement au contact d'un corps de constante diélectrique plus faible. Ainsi par rapport à l'eau qui a une constante électrique particulièrement grande (3) la règle de COHEN indique que la plupart des corps doivent se charger négativement. Cette règle, généralement applicable aux liquides purs, se vérifie moins bien avec les solutions d'électrolytes.

En 1905 J. PERRIN montra que si l'électrisation des particules et du liquide est bien due aux

ions provenant de la dissociation des traces de sel toujours présentes dans le liquide, cette électrisation peut changer de signe suivant la nature et la quantité des substances en solution. D'après cet auteur, le sens du transport est sous la dépendance de la réaction acide ou alcaline du liquide dans lequel se trouvent les particules, c'est-à-dire de son pH.

Dans certains cas d'ailleurs, le changement du sens de transport correspond à une variation extrêmement petite de la réaction du milieu. Il est possible, en outre, d'inverser le sens de déplacement des particules en ajoutant au liquide alcalin ou acide un sel métallique donnant naissance à des anions ou à des cations polyvalents (ferrocyanure de potassium, chlorure de lanthane, etc.). Actuellement, aucune loi générale ne semble pouvoir résumer toutes les observations, et il est probable que les affinités chimiques particulières des substances en présence jouent un grand rôle.

Ces considérations nous amènent à dire un mot des hypothèses qui ont été émises pour interpréter l'origine de la couche électrique double qui s'établit au contact d'un solide et d'un liquide antérieurement à toute action électrique extérieure.

La plus suggestive, pour les applications, consiste à rattacher cette électrisation à l'adsorption par les parois solides des ions d'un certain signe existant dans le liquide (par suite de la dissociation des traces de sels existant dans ce dernier), les ions de l'autre signe demeurant dans le liquide et au voisinage des dites parois grâce à l'attraction qu'exercent entre elles deux charges de signe contraire. Ainsi s'explique simplement l'influence de très petites quantités d'acide ou de base sur le sens de l'électrophorèse et celui de l'électroosmose (inverse du premier) ; des particules de nature très variée (charbon, silice, soufre, gélatine, soie, etc...) se chargent positivement dans de l'eau additionnée de quantités extrêmement faibles d'un acide monovalent quelconque et négativement dans de l'eau additionnée de quantités très faibles d'une base monovalente quelconque.

2. — Théorie d'HELMHOLTZ-PERRIN.

α. — ELECTROPHORESE :

Les conceptions qualitatives de QUINCKE furent précisées par HELMHOLTZ et plus tard par J. PERRIN qui établirent une théorie en bon accord quantitatif avec les phénomènes observés notamment sur des tubes capillaires. Voici l'essentiel de la théorie exposée par J. PERRIN.

Considérons un tube capillaire faisant communiquer deux masses liquides maintenues au même niveau, de façon que n'intervienne aucune pression hydrostatique. Faisons agir un champ

(3) Environ 80 contre 1,4 pour l'air.

électrique parallèle au tube et, un état de régime étant atteint, soit u la vitesse moyenne du liquide dans le tube. Admettons que l'une des couches électriques soit adhérente à la paroi, tandis que l'autre se comporte comme une couche infiniment mince de charge égale et de signe opposé se trouvant à une distance d de la paroi et se mouvant à la vitesse u du liquide qu'elle entraîne. Soit H le champ électrique et σ la densité électrique de la couche. La force qui s'exerce sur l'unité d'aire de cette couche est σH .

Or, par définition même du coefficient de viscosité η du liquide, cette force est égale au produit de ce dernier par le gradient de vitesse, soit, en supposant, en première approximation, que l'écoulement se fait « en bloc » c'est-à-dire que la vitesse du fluide, passe de u à 0 dans l'épaisseur d de la double couche :

$$\sigma H = \eta \frac{u}{d}$$

ce qu'on peut écrire en faisant apparaître le moment électrique d de la couche double :

$$\sigma d = \eta \frac{u}{H} \quad (1)$$

Si ϕ désigne le débit du tube capillaire on a évidemment :

$$\phi = \pi r^2 u \quad \text{soit} \quad u = \frac{\phi}{\pi r^2}$$

En portant cette valeur de u dans (1) on obtient :

$$\sigma d = \frac{\eta}{\pi r^2} \frac{\phi}{H} \quad (2)$$

Si, au lieu d'un seul tube capillaire, on emploie un diaphragme poreux équivalent à un faisceau de n tubes de rayon r ayant pour section totale $s = n \pi r^2$ donnant un débit de $\Phi = n \phi$ on aura :

$$\sigma d = \frac{\eta}{s} \frac{\Phi}{H} \quad \text{soit} \quad \Phi = \frac{\sigma d}{\eta} H s \quad (3)$$

On introduit parfois dans cette formule la différence de potentiel ζ dite « potentiel électrocinétique » entre les 2 faces de la couche double et la constante diélectrique D (ou pouvoir inducteur spécifique) du liquide.

Ces deux faces peuvent être en effet considérées comme les 2 armatures d'un condensateur dont le diélectrique serait constitué par une lame d'épaisseur d du liquide ; la capacité **par unité de surface** d'un tel condensateur, serait

$\frac{K}{4 \pi d}$ et par définition :

$$\sigma = \zeta \frac{D}{4 \pi d}$$

de sorte que

$$\sigma d = \zeta \frac{D}{4 \pi}$$

En portant cette valeur dans l'expression (3) on trouve :

$$\Phi = \zeta \frac{D}{4 \pi \eta} H s \quad (4)$$

En vue des applications éliminons H en introduisant la densité de courant j dans le liquide traversant les capillaires et la résistivité ρ_w de ce liquide. Si U est la différence de potentiel appliquée aux extrémités des n tubes de section totale s on a :

$$H = \frac{U}{L} \quad (\text{en volts par cm. par exemple})$$

et d'autre part

$U = RI$, R étant la résistance électrique du liquide égale à $\rho_w \frac{L}{s}$ et :

$I = js$: l'intensité totale traversant le liquide.

D'où :

$$H = \frac{U}{L} = \frac{Rjs}{L} = \rho_w j$$

En portant cette valeur de H dans l'équation (4) on trouve :

$$\Phi = \zeta \frac{\rho_w D}{4 \pi \eta} j s \quad (5)$$

On voit ainsi que conformément aux lois établies expérimentalement le débit électroosmotique est proportionnel :

- 1° à la densité de courant j ;
- 2° à la section nette s du diaphragme poreux ;
- 3° à la résistivité électroosmotique du liquide ;
- 4° à l'inverse de la viscosité du liquide ;
- 5° au potentiel électrocinétique ζ et à la constante diélectrique D du liquide.

Il est indépendant de la longueur des tubes capillaires, laquelle interviendra cependant pour fixer la différence de potentiel U nécessaire pour produire le courant total $j s$.

β . — L'ELECTROOSMOSE :

Considérons une particule unique en suspension dans un liquide qui se trouve dans un champ électrique H . Si la particule était maintenue immobile le liquide glisserait à sa surface ; mais la particule n'étant pas immobile, elle se déplacera en sens inverse et prendra bientôt un mouvement uniforme. Il est naturel d'admettre que la vitesse relative u des deux couches électriques

(4) Cette résistance électrique devrait tenir compte de la f.e.m. de filtration qui semble devoir agir comme force contre-électromotrice dans le phénomène de l'électrophorèse.

de contact est la même que si la particule était maintenue au repos. L'équation (1) précédemment établie peut être conservée :

$$\sigma d = \eta \frac{u}{H} \quad \text{d'où} \quad u = \frac{\sigma d}{\eta} H \quad (6)$$

D'une manière un peu plus concrète on peut raisonner de la façon suivante. Soit q la charge électrique portée par la particule. Du fait du champ électrique elle sera soumise à une force :

$$F = q H$$

Sous l'influence de cette force la particule va se déplacer pour atteindre une vitesse constante lorsque la force de frottement f due à la viscosité du fluide qu'elle traverse deviendra égale à l'action du champ électrique. En raison des faibles vitesses en jeu f peut être déterminé par la formule approchée de STOKES :

$$f = 6 \pi r \eta u$$

r étant le rayon de la particule.

Pour $F = f$ on aura :

$$q H = 6 \pi r \eta u$$

d'où

$$u = \frac{q H}{6 \pi r \eta} \quad (6 \text{ bis})$$

Les formules 6 et 6 bis (dans lesquelles on pourrait comme nous l'avons fait pour l'électrosmose remplacer H par $\rho_w j$) montrent que la vitesse d'une particule est proportionnelle au champ électrique appliqué et inversement proportionnelle à son rayon et à la viscosité du liquide.

γ. — FORCE ELECTROMOTRICE DE FILTRATION :

Soit p la différence de pression aux extrémités d'un tube capillaire de longueur l . Les lois de l'hydraulique indiquent que la vitesse à la paroi v dans un tel tube est donnée par la formule :

$$v = \frac{r}{2\eta} \frac{p}{l} d \quad (\text{POISEUILLE})$$

Le mouvement uniforme de la couche électrique entraînée par le liquide produit un courant de **convection** (5)

$$i = 2 \pi r v \sigma$$

ce qui s'écrit en remplaçant v par sa valeur.

$$i = \frac{\pi r^2}{\eta} \frac{p}{l} \sigma d$$

(5) Il s'agit bien d'un courant de convection puisque les molécules d'eau de la couche sont les véhicules matériels des charges électriques dont le déplacement constitue le courant électrique considéré. Dans les courants de conduction qui se manifestent dans les métaux par exemple, on admet que ce sont les électrons qui convoient les charges électriques.

Lorsqu'un régime permanent s'est établi, ce courant doit, à condition que la paroi soit isolante, équilibrer le courant de **conduction** produit au sein du liquide par la force électromotrice E de filtration cherchée ; ce courant i' a évidemment pour valeur :

$$i' = \frac{E}{\rho_w} \frac{\pi r^2}{l}$$

Ecrivons que $i = i'$:

$$\frac{E}{\rho_w} \frac{\pi r^2}{l} = \frac{\pi r^2}{\eta} \frac{p}{l} \sigma d$$

soit

$$\frac{E}{\rho_w} = \sigma d \frac{p}{\eta}$$

d'où

$$E = \sigma d \frac{p}{\eta} \quad (7)$$

Nous bornerons là ce rappel des principes essentiels de l'électrosmose et des phénomènes connexes en renvoyant pour plus de détail aux ouvrages spécialisés (voir bibliographie sommaire à la fin de la présente note). Il est fort possible que les théories exposées plus haut ne soient pas concrètement exactes et ne constituent qu'un symbolisme permettant une représentation simple de phénomènes très complexes. Elles n'en constituent pas moins pour l'ingénieur un instrument de calcul et de prévision donnant des résultats généralement vérifiés par l'expérience avec une approximation suffisante.

Il est intéressant de souligner dès maintenant que les phénomènes analysés sont d'une ampleur qui peut être considérable pour de faibles dépenses d'énergie électrique ; tandis que dans l'électrolyse la matière est transportée à l'état d'ions ce qui exige environ 27 ampères-heure (96.600 coulombs) par valence gramme, (ce qui correspond, compte tenu des forces électromotrices généralement utilisées, à un dépôt de 2 kilogrammes de matière par kilowatt-heure au maximum) dans l'électrophorèse un ion transporte le poids de matière représenté par la particule qui l'a adsorbé, lequel est bien plus considérable que le sien.

Finalement, le rapport du rendement d'une telle opération à celui de l'électrolyse est d'autant plus élevé que les particules en suspension entraînées par les ions sont grosses et denses.

Théoriquement s'il ne se produisait aucun phénomène secondaire, ce rapport pourrait atteindre une valeur de l'ordre du million ; pratiquement, on a obtenu, dans de bonnes conditions au Laboratoire, des valeurs de l'ordre de 1.000

soit 2 tonnes par kilowatt-heure (6). Mais si le liquide est rendu fortement conducteur par la présence d'électrolytes, l'énergie électrique est en majeure partie utilisée par l'électrolyse et le rendement devient très mauvais.

II. — TRAVAUX DU LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE DE ZURICH.

a) Etudes théoriques :

En vue de l'application des phénomènes d'électrosmose à la mécanique des sols MM. W. SCHAAD et R. HAEFELI ont repris sous la forme suivante les résultats de la théorie de HELMHOLTZ-PERRIN-SMOLUCHOWSKI dont nous venons d'esquisser les grandes lignes.

Considérons (fig. 1) un tube capillaire de lon-

fig. 1

Écoulement hydro-électroosmotique dans un tube capillaire.

gueur l en matière non conductrice soumis à ses deux extrémités à une pression statique hydraulique $p = \gamma_w h$ et à une différence de potentiel U engendrant dans le tube un courant électrique d'intensité I . Suivant la formule (5) donnée au paragraphe I ci-dessus la vitesse moyenne u du fluide dans le tube capillaire sera :

$$u = \frac{r^2}{8\eta} \frac{p}{l} + \zeta \frac{p_w D}{4\pi\eta} j \quad (8)$$

Cette équation peut être mise sous la forme :

$$u = u_0 + u_1 \quad (9)$$

en désignant par :

u_0 la vitesse de l'écoulement laminaire (donnée par la formule de POISEUILLE) qui s'établirait en l'absence de tout phénomène électrique du

(6) C'est ce qui a permis d'utiliser industriellement l'électrophorèse pour le traitement de matières de faible valeur marchande telles que le kaolin, les ocres, la tourbe, les gaz de fours métallurgiques, les fumées, etc...

fait de la charge hydraulique $h = \frac{p}{\gamma_w}$

et par u_1 la vitesse due à la seule action électroosmotique.

En vue de rendre les équations ci-dessus applicables à l'écoulement d'un fluide dans un massif perméable à grains fins, la vitesse moyenne u peut être remplacée par la « vitesse brute de filtration » v_F rapportée à la surface totale d'écoulement de la masse poreuse. L'équation (9) s'écrit alors :

$$v_F = v_D + v_E = kJ + k_E \cdot E \quad (10)$$

v_F étant la vitesse de filtration **globale** ;

v_D la vitesse brute de filtration suivant la loi de DARCY ;

v_E la vitesse électroosmotique de filtration ;

k le coefficient de perméabilité selon Darcy ;

J le gradient de pression hydraulique ;

E l'intensité du champ électrique ;

k_E le coefficient électroosmotique défini comme étant la vitesse engendrée par une intensité de champ E de 1 volt par cm. ;

En pratique le coefficient électroosmotique dépend de nombreuses caractéristiques de l'agrégat poreux et du liquide qui le traverse : coefficient de porosité, résistance électrique (galvanique et électroosmotique) du solide et du liquide, viscosité et constante diélectrique du liquide, etc...

La valeur de k_E qui caractérise le matériau poreux au point de vue de l'effet électroosmotique peut être mesurée directement par des essais de laboratoire comme nous le verrons plus loin. En fait, il est apparu plus pratique et plus suggestif de déterminer la « charge électroosmotique » H_E ou la « charge électroosmotique spécifique » h_E . La première H_E est définie suivant la fig. 2 comme la charge exprimée en centimètre-

fig. 2

Principe de la mesure de la charge électroosmotique H_E .

tres engendrée par l'application d'une tension de 1 volt à un échantillon du matériau considéré essayé dans un appareil et suivant des méthodes normalisées. Lorsque dans l'appareil d'essai de la fig. 2 cette charge est atteinte, il s'établit un état d'équilibre (débit nul) qui montre que la pression électroosmotique équilibre la pression hydrostatique. On a alors $v_F = 0$ et

$$J = \frac{H_E}{L}$$

de sorte que l'équation (10) s'écrit :

$$v_F = -k J + k_E E = -k \frac{H_E}{L} + k_E \frac{U}{L} = 0$$

L étant la longueur de l'échantillon.

Par suite on a :

$$H_E = \frac{k_E}{k} U = h_E U \quad (11)$$

Le rapport $\frac{k_E}{k}$ représente la « charge spécifique électroosmotique » h_E exprimée en cm. par volt (7).

Si l'on porte cette valeur de h_E dans l'équation (10) on obtient :

$$v_F = k \left(J + \frac{k_E}{k} E \right) = k (J + h_E E)$$

équation qui montre bien que h_E caractérise l'accroissement de la vitesse de filtration v_F qui peut être obtenu en appliquant un champ de E volts par cm. à un écoulement souterrain déterminé, antérieurement à toute action électrique extérieure, par son coefficient de perméabilité k et son gradient de charge hydraulique J . **Le paramètre h_E peut donc être pris comme mesure de l'effet électroosmotique.**

Dans les applications de l'électroosmose au drainage des terrains les calculs simples ci-dessus sont insuffisants car on est amené à considérer la répartition des lignes de courant hydraulique et électrique dans un espace à trois ou à la rigueur à deux dimensions.

L'équation différentielle générale de l'écoulement est alors (en unités C. G. S.)

$$k \Delta \Phi_H + D_B \Delta \Phi_E = -4\pi \epsilon \quad (12)$$

Δ est l'opérateur de LAPLACE ;

Φ_H le potentiel du champ hydraulique de l'écoulement souterrain ;

(7) En effet le coefficient de perméabilité k s'exprime en cm. par seconde, tandis que le coefficient électroosmotique k_E s'exprime en cm./sec. par volts/cm. donc le rapport de ces deux quantités s'exprimera en :

$$\frac{\text{cm./sec.}}{\text{volts/cm.}} \cdot \frac{1}{\text{cm./sec.}} = \text{cm. par volt.}$$

D_B la constante diélectrique du terrain saturé ;

Φ_E le potentiel du champ électrique ;

ϵ la densité de charge électrique par unité de volume.

L'application de cette équation à des cas concrets est assez laborieuse car les lignes de courant des champs hydraulique et électrique et aussi leurs « conditions aux limites » ne coïncident généralement pas ; l'équation (10) doit être alors considérée comme une égalité vectorielle. Le débit total Q_E transporté par électroosmose reste toujours de la forme :

$$Q_E = k_E \rho_w I$$

I étant l'intensité totale dans le terrain.

L'application des méthodes ci-dessus au dispositif simple de drainage représenté par la fig. 3

fig. 3

Schéma d'un puits de drainage électroosmotique.

qui comprend 2 électrodes enfoncées verticalement dans le terrain aquifère a conduit aux résultats suivants :

Résistance électrique entre les 2 électrodes :

$$R = \frac{\rho_w}{\pi i} \log_e \left(\frac{S}{r} \right) \text{ en ohms} \quad (13)$$

Intensité :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\pi U t}{\rho_w \log_e S/r}$$

en ampères (14).

Débit électroosmotique :

$$Q = k_E \rho_w I \pi U t \frac{1}{\log_e s/r} \text{ en cm}^3/\text{s} \quad (15)$$

Dans les formules ci-dessus :

- ρ est la résistivité du sol à l'état saturé ;
- t la longueur et la portion des électrodes immergées dans la nappe souterraine ;
- s la distance entre les électrodes ;
- r le rayon des électrodes ;
- U la différence de potentiel appliquée entre les électrodes.

b) Essais de laboratoire :

Ces essais avaient pour objet de vérifier la validité des lois de la filtration électroosmotique dans les massifs pulvérulents à grains fins et de mettre au point une méthode de mesure du coefficient électroosmotique k_E et de la charge spécifique électroosmotique h_E d'un matériau donné.

A cet effet, on a utilisé l'appareil représenté par les fig. 4 et 5 (oedomètre convenablement

fig. 4

Appareil pour la mesure du débit électroosmotique.

modifié). L'échantillon du matériau est serré dans un cylindre en verre entre deux pistons percés de trous en matière plastique indéformable portant 2 électrodes perforées en platine (pour éviter les corrosions électrolytiques) ; la face inférieure du piston inférieur est biseautée de façon à faciliter l'adduction des gaz pouvant être éventuellement produits par électrolyse, vers un tuyau d'échappement ad hoc. L'appareil peut être utilisé suivant deux méthodes différentes :

1. — Mesure du débit filtré par électroosmose :

Si l'appareil est disposé de façon que le niveau

soit le même à l'entrée et à la sortie (fig. 4) on a $J = 0$ et l'équation (10) donne :

$$v_E = k_E E$$

Dans les conditions de symétrie réalisées, le champ électrique $E = \frac{d\Phi_E}{ds}$ est constant sur toute la longueur de l'échantillon et égal à $\frac{U}{L}$; d'où

$$k_E = v_E \frac{L}{U}$$

v_E est déterminé en mesurant le volume V écoulé dans un temps déterminé et en divisant le débit obtenu par la section F de l'échantillon.

2. — Mesure de la charge (hauteur d'eau) engendrée par électroosmose à débit nul.

L'électro-oedomètre est alors disposé comme l'indique la fig. 5.

fig. 5

Appareil pour la mesure de la charge statique électroosmotique.

Les connexions électriques sont inversées par rapport à la fig. 4, de façon que le flux électroosmotique soit dirigé de haut en bas. Le tuyau d'amenée d'eau est remplacé par un tube vertical gradué de hauteur suffisante.

Les fig. 2 et 5 montrent comment on peut mesurer alors directement la charge électroosmotique H_E d'où l'on déduit la charge électroosmotique spécifique $h_E = \frac{H_E}{U}$

Comme nous avons montré que

$$H_E = \frac{k_E U}{k} = h_E U$$

on peut calculer le coefficient électroosmotique k_E si l'on connaît le coefficient de filtration k (déterminé avec le même appareil en supprimant le champ électrique).

Pour montrer l'importance que peut prendre H_E dans certains terrains, nous résumons ci-après les mesures faites sur un sable limoneux ayant un coefficient de filtration k de 10^{-7} cm : s environ.

L'essai devait être effectué suivant la méthode 2 ci-dessus (à débit nul).

Pendant la première partie de l'essai poursuivi pendant 8 heures sous une intensité constante de 10 milliampères, la hauteur H_E dans le tube piézométrique passa progressivement de 0 à 28 centimètres environ (la tension nécessaire croissant corrélativement de 10 à 19,4 volts environ).

Dans la deuxième partie de l'essai, assez irrégulière, l'intensité tomba peu à peu jusqu'au dessous de 4 milliampères, alors que la tension d'alimentation était de l'ordre de 27 volts ; au bout de 4 jours, la hauteur H_E atteignait 1,50 mètre, limite des possibilités de mesure de l'appareil.

On calcula alors le coefficient électroosmotique k_E d'après le débit filtré sous la tension moyenne de 14,7 volts dans la première partie de l'essai et on trouva :

$$k_E = 8,7 \times 10^{-6} \text{ cm/s par volt/cm}$$

On en déduit :

$$h_E = \frac{k_E}{k} = \frac{8,7 \times 10^{-6}}{10^{-7}} = 87 \text{ cm par volt}$$

Pour la tension moyenne d'essai de 14,7 volts on aurait donc obtenu en poursuivant l'expérience pendant un temps assez long pour obtenir un débit nul :

$$H_E = h_E U = 0,87 \times 14,7 = 12,80 \text{ mètres.}$$

Un champ électrique de 1 volt par cm. engendrera dans ce terrain une augmentation de la vitesse de filtration de

$$87 \times 10^{-7} \text{ cm./s.}$$

ce qui est considérable si l'on remarque que la filtration naturelle ne donnerait, pour une pente de la nappe $J = 1$, que 10^{-7} cm./s.

Pour fixer les idées, indiquons encore les caractéristiques électroosmotiques d'une poudre de quartz (grains de 0,002 à 0,2 m_m ; $d_{50} = 0,13 m_m$) utilisée, en raison de sa résistance aux agents chimiques, par le Laboratoire de Zurich pour certaines recherches théoriques. Pour ce matériau, on a trouvé :

$$k_E = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s par volt/cm.}$$

$$h_E = 12 \text{ cm par volt.}$$

$$K = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s.}$$

En raison de la plus grande perméabilité naturelle du matériau, la charge électroosmotique par volt

$$h_E = \frac{k_E}{k}$$

est moins grande que dans le cas précédent, malgré une valeur supérieure de k_E .

c) Essais sur le terrain :

Le Laboratoire de Zurich a effectué dans un sol de sable limoneux une expérience de drainage électroosmotique en utilisant le montage schématisé dans la fig. 6. Les électrodes étaient

fig. 6

Essai de puits de drainage électroosmotique.

constituées par des tubes à gaz ordinaires de 22,7 mm. de diamètre alimentées en courant continu par un groupe de soudure à tension réglable. Le niveau de l'eau dans le puits relié à l'électrode négative étant, avant la mise sous tension des électrodes, abaissé par pompage, l'essai consistait à relever en fonction du temps la remontée de l'eau après arrêt du pompage avec et sans circulation du courant électrique.

La fig. 7 donne le résultat d'un tel essai pour

fig. 7

Résultats de l'essai du dispositif de la fig. 6

l'écoulement dans un talus de tranchée saturé d'eau par une pluie continue illustrent bien l'action stabilisatrice d'un puits de drainage creusé un peu en arrière du sommet du talus et dont la profondeur est 1,5 fois celle de la tranchée.

Bien entendu cet effet stabilisateur est obtenu quel que soit le procédé employé pour assurer la filtration de l'eau souterraine vers le puits, mais dans des sols à grains très fins seule l'électroosmose permet d'obtenir un coefficient de filtration convenable.

Les fig. 10 et 11 montrent, de la même ma-

fig. 10

Diagramme d'écoulement aux abords d'un rideau de palplanches durant une période de pluie continue.

fig. 11

Effet d'un puits électroosmotique sur le diagramme de la fig. 10

nière comment une ligne de puits de drainage placée derrière un rideau de palplanches protégeant une fouille empêche le soulèvement du fond de celle-ci sous l'action des sous-pressions.

Après avoir exécuté des essais systématiques au Laboratoire sur 26 types de sols, allant du limon pur à l'argile grasse, le Docteur CASA-GRANDE a pu effectuer durant la dernière guerre des applications à grande échelle de son procédé ; voici une description sommaire des plus intéressantes d'entre elles.

b) Tranchée de chemin de fer près de SALZGITTER :

Cette tranchée, pour deux voies de chemin de fer, devait être établie dans un terrain inconsistant de loess et de vase. Bien que sa profondeur fût seulement de 7 mètres, l'exécution des talus, même par beau temps, s'avéra impossible, car la nappe d'eau souterraine faisait « couler » le terrain dès que la profondeur de la fouille dépassait 2 mètres.

Un premier essai de drainage électrique fut effectué sur une section de tranchée de 100 m. de long. Le dispositif de drainage mis au point sur modèle réduit au Laboratoire comportait au sommet des talus de la tranchée 2×10 puits cathodiques (longueur 7,50 m ; diamètre 0,10 m) espacés de 10 mètres.

Des électrodes (anodes) en tube à gaz de 1 cm. de diamètre et de 7,50 m. de long furent placées entre les puits. L'eau arrivant dans ces derniers était épuisée par de petites pompes automatiques refoulant dans un collecteur unique aboutissant à deux postes de jaugeage (par capacité étalonnée).

Avant la mise sous tension du dispositif, le débit total des 20 puits ne dépassait pas $0,4 \text{ m}^3$ par 24 heures ; quelques heures après, sous l'action d'une tension de 180 volts et d'une intensité de 19 ampères, il atteignait plusieurs fois ce chiffre. Durant les 8 semaines que dura la construction du tronçon d'essai, le débit pompé se maintint à peu près constant et égal à $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, soit 150 fois environ le débit de drainage naturel.

Pour économiser le courant, la tension d'alimentation fut réduite à 90 volts lorsqu'on atteignit le fond de la tranchée ; le débit drainé resta le même. La mise hors circuit des puits amenait une réduction sensible du débit drainé au bout de 6 heures ; au bout de 24 heures la valeur de celui-ci tombait au chiffre observé initialement en l'absence de tout traitement électrique.

Les résultats de ce drainage sur la tenue du terrain furent excellents. Alors que précédemment la pelle mécanique ne pouvait s'approcher du bord de la tranchée et à fortiori pénétrer dans celle-ci sous peine de basculer ou de s'enliser, tous les terrassements purent être effectués à la pelle sans difficulté. La pente des talus se maintenait à 1 : 0,75 alors qu'avant le traitement électrique les talus à 1 : 3 s'éboulèrent.

A titre d'essai, on supprima l'alimentation en

énergie électrique d'un puits ; au bout de 6 heures une masse molle de terrain commença à couler sur le talus voisin du puits ; la remise sous tension de ce dernier arrêta ce phénomène au bout de peu de temps.

A la suite de cet essai, la tranchée fut construite sur plusieurs kilomètres en employant le même procédé et sans incident.

c) Fondation d'un pont-route à SALZGITTER :

Nature du terrain : lœss vaseux.

* Profondeur de la fouille : 6 m.

Dimensions en plan : 8 m. $\times$ 15 m.

Drainage par 6 puits à électrodes analogues à ceux décrits précédemment et alimentés sous 90 volts.

La fouille a pu être exécutée avec des parois presque verticales.

d) Base de sous-marins à TRONDHJEM :

Nature du terrain : limon argileux avec lentilles de sable.

Profondeur de la fouille : 14 mètres.

Dimensions en plan : 230 m. $\times$ 160 m.

L'emplacement était à proximité de la mer et la nappe souterraine à quelques mètres au-dessous de la surface du sol. Malgré une double enceinte de palplanches et des pentes de talus très faibles, il fut impossible de poursuivre les travaux en raison de la mauvaise tenue du terrain (déversement et déplacement horizontal des palplanches malgré 15 mètres de fiche, remontrée du fond de fouille, etc...).

Les terrains étant au voisinage de la mer, contenaient du sel qui diminuait considérablement leur résistivité, de sorte qu'il fallait s'attendre à de fortes consommations de courant.

Après divers essais sous des tensions échelonnées entre 10 et 200 volts, la tension de 40 volts fut adoptée ; elle conduisit à une intensité de 20 à 30 ampères par puits.

Le dispositif de drainage comprenait une double rangée de puits à électrode espacés de 10 mètres et implantés sur une berme aménagée à mi-hauteur des talus de la fouille. Le diamètre des puits était de 0,25 m. et leur profondeur de 20 m. Chaque puits était desservi par une petite pompe automatique refoulant dans un collecteur unique.

La quantité d'eau pompée était très variable d'un puits à l'autre en raison de l'hétérogénéité du sol ; avant la mise sous tension elle variait de 1 à 50 litres par heure et par puits ; après elle atteignit 11 à 479 litres/heure. Les terrassements furent exécutés sans difficulté et la consommation d'énergie s'éleva en moyenne à 0,4 kwh par m³ de terre excavé.

e) Tranchée pour tunnel dans la vallée de LERKENDAL :

Ce tunnel de chemin de fer situé près de

TRONDHJEM devait traverser, avant de rencontrer la roche en place, des dépôts de limons argileux très mous, ayant une teneur en humidité de 18 à 37 % (du poids sec) et une limite de liquidité comprise entre 25 et 30 pour cent. La construction d'une tranchée qui aurait atteint 19 mètres de profondeur fut jugée impraticable et l'on envisageait d'exécuter le souterrain par la méthode du bouclier. Mais pour accélérer la construction, on se décida pour l'exécution d'un tunnel tubulaire construit dans une tranchée ouverte drainée par électrosmose et comblée après la terminaison de l'ouvrage.

Le dispositif de drainage comportait sur chaque talus (à 1 : 2) de la tranchée, deux rangées de puits à électrodes installés sur une berme de plusieurs mètres de largeur aménagée à mi-hauteur de l'excavation. Les puits avaient 276 mm de diamètre et étaient foncés jusqu'à 2 mètres au-dessous du radier de la tranchée ; ils étaient espacés de 10 mètres. Les électrodes positives descendues à la même profondeur que les puits cathodiques et implantées dans leur intervalle étaient constituées par des tubes à gaz de 1 1/2 pouces.

La tension d'alimentation était de 30 volts et l'intensité de 15 ampères par puits. En l'absence de courant les puits ne collectaient qu'une quantité d'eau négligeable ; sous tension leur débit était de 120 litres par jour et par puits.

f) Autres applications :

L. CASAGRANDE signale les essais de séchage de boues résiduelles industrielles effectués à WULFRATH. Une réduction de 10 à 20 pour cent de la teneur en eau est obtenue facilement et économiquement ; on peut obtenir un séchage beaucoup plus poussé mais la consommation d'énergie et la durée de l'opération augmentent sensiblement.

B.-A. RZHANITZIN a publié une étude sur les essais effectués en Russie sur « La stabilisation électrochimique des sols argileux ». La méthode employée semble utiliser à la fois l'électrosmose et la substitution électrolytique de certaines bases plus résistantes à certains sels existant dans les sols pour la formation in situ de gels ferriques ou alumineux. Les cathodes sont en cuivre et les anodes en aluminium et on injecte des solutions de CaCl₂ ou de NaCl.

Des essais ont été exécutés en Russie pour contrôler et réduire le gonflement au dégel des sols argileux en agissant par électrosmose sur la montée de l'eau dans ces terrains.

MM. SCHAAD et HAEFELI ont souligné l'intérêt que présenterait l'injection électrosmotique de terrains trop fins pour être consolidés par les méthodes usuelles.

IV. — CONCLUSION.

L'exposé qui précède montre que les phénomènes d'électroosmose qui paraissaient devoir rester du domaine du laboratoire ou de certaines fabrications physico-chimiques, ont trouvé quelques intéressantes applications sur les chantiers de travaux publics. Des études sont poursuivies à l'étranger en vue d'étendre leur emploi aux injections de consolidation des terrains fins, à l'amélioration de certains matériaux de construction, à l'assainissement des massifs de maçonnerie humides, etc... Il est souhaitable que les Ingénieurs français suivent cet exemple.

En ce qui nous concerne nous avons étudié la possibilité d'appliquer l'électrophorèse à la décantation accélérée de grands volumes d'eau contenant des limons ou des sables très fins ; les dispositifs dessableurs classiques établis au voisinage d'eau d'usines hydroélectriques ou de canaux d'irrigation sont impuissants à précipiter les particules de dimensions inférieures à 0,1 ou 0,2 $\frac{mm}{m}$; dans certains cas particuliers l'élimination d'éléments aussi fins serait pourtant souhaitable.

Les applications industrielles déjà anciennes de l'électrophorèse à la purification des argiles (kaolin) et au dépoussiérage des gaz constituent des précédents encourageants. Si l'on admet par comparaison avec des résultats d'opérations d'électrophorèse industrielle, que l'on peut déposer 1 kg. de matière (8) par ampère/heure il semble a priori possible en utilisant des électrodes de grande surface suffisamment rapprochées d'éliminer la quasi-totalité des particules (supposées très fines) en suspension dans un débit de 1 m³/s. présentant une turbidité de 1 pour mille (9) au moyen d'un délimoneur absorbant une puissance de 40 kilowatts sous une dizaine de volts.

Les premières expériences que nous avons effectuées avec des suspensions à 1°/00 de kaolin ou de vases fines montrent que le dispositif de principe envisagé (fig. 12) assure une sédimentation accélérée des particules contenues dans l'eau ; malheureusement les phénomènes d'électrolyse concomitants à l'électrophorèse absorbent une énergie considérable ; il en résulte un rendement bien inférieur à celui envisagé ci-dessus.

Nous poursuivons des essais en vue de réduire

(8) C'est là, semble-t-il, une valeur très prudente ; des essais industriels de séchage de la tourbe par électroosmose auraient montré qu'une intensité de courant donnée déplace 5.000 fois plus d'eau qu'elle n'en pourrait décomposer par électrolyse.

(9) Chiffre très élevé si l'on admet que les grosses particules sont au préalable éliminées par un dessableur classique à gravité.

la consommation d'énergie par électrolyse sans gêner l'efficacité du processus d'électrophorèse.

fig. 12

Schéma de réalisation d'un élément « délimoneur électrique ».

BIBLIOGRAPHIE

- I - A. BOUTARIC
Electrophorèse et électroosmose
« Revue Générale de l'Electricité », 20 juillet 1929.
- II - J. DUCLAUX
« Revue Générale des Colloïdes », 2 mars 1924 et 3 avril 1925.
- III - G. GENIN
Osmose, Dialyse, Ultra-filtration 1928 (Dunod).
- IV - W. KOPACZEWSKI
« L'état colloïdal et l'Industrie », 1925 - (Béranger, édit.).
- V - L. BRUNINGHAUS
Electrisation et conduction électrique des hydrocarbures,
« Revue Générale de l'Electricité », 16 - 23 - 30 novembre 1929.
- VI - CASAGRANDE
The application of electroosmosis to practical problems in foundations and earthworks Building,
« Research Station London Techn. Pap. », n° 30, 1947.
- VII - W. SCHAAD et R. HAEFELI
Elektrokinetische Erscheinungen und ihre Anwendung in der Bodenmechanik. (Les phénomènes électrocinétiques et leurs applications à la mécanique des sols.
« Schweizerische Bauzeitung », n° 16 - 17 et 18 mai 1947.
- VIII - Ev. DAHLQUIST
Filtres électrostatiques.
« ASEA-Revue », janvier-mai 1947.