Essai semi-industriel de drainage électroosmotique d'un talus

Semi-industrial, electro-osmotic drainage test of a slope

PAR G. RÉMÉNÉRIAS

ADJOINT AU CHEF DU SERVICE DES ÉTUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES
DE L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Rappel du principe de ce mode de drainage : accélération de la filtration par adjonction d'une pression électroosmotique à la charge hydraulique. Dispositif de drainage du poste de Génissiat : implantation des anodes, mesure et enregistrement du débit instantané au débouché du drain formant cathode; essais en période sèche, essais en période pluvieuse, essais en régime discontinu; réseau de fissures entre un puits et un drain. Variations du débit drainé : forte pointe au début de chaque essai et décroissance pulsatoire.

Conclusions : la résistance apparente croît au fur et à mesure du dessèchement du terrain; les consommations spécifiques moyennes d'électricité, de 12 Ah par litre d'eau en période sèche et de 6 Ah en période pluvieuse, semblent pouvoir être réduites par un groupement judicieux des électrodes et la recherche de l'intensité optimum du courant.

Summary of the principles : acceleration of filtration by addition of an electro-osmotic pressure to the hydraulic head. Drainage arrangements at the Génissiat transformer post : sinking of anodes, measurement and recording of instantaneous discharge at outlet of drain forming cathode; tests in dry periods, tests in wet periods, tests with irregular regime; fissure network between a well and a drain. Variation of drained discharge; high peak at beginning of each test, followed by pulsating decrease. Conclusions : the apparent resistance increases with the dryness of the soil; it would seem possible to reduce the average specific consumption of electricity, which is 12 Ah per litre of water in dry periods and 6 Ah in rainy periods, by the careful grouping of electrodes and the determination of the optimum current intensity.

Dans un précédent mémoire, intitulé « Application de l'électroosmose à l'exécution de certains travaux en terrains aquifères » (*), nous avons rappelé le mécanisme des phénomènes d'électroosmose et donné quelques exemples d'utilisation pratique de ceux-ci pour accélérer la filtration de l'eau à travers des terrains à grains très fins (donc peu perméables) comme les limons argileux. La méthode consiste essentiellement à accélérer la filtration en ajoutant à l'action de la charge hydraulique « naturelle »

de l'eau, existant dans le terrain à drainer, celle de la « charge ou pression électroosmotique » réalisée en faisant circuler un courant électrique continu dans ledit terrain.

La présente étude a pour objet de donner les résultats d'un essai de drainage électroosmotique exécuté en 1950 et 1951 par le Service des Etudes et Recherches Hydrauliques d'Electricité de France, à la demande de la Direction de l'Équipement du Réseau de Transport, sur le talus nord du poste de Génissiat. Il s'agit là d'un essai de caractère industriel ayant pour but de préciser les conditions d'emploi, l'efficacité et le prix de revient du procédé dans le cas particulier considéré, plutôt que le mécanisme des phénomènes mis en jeu.

(*) Voir la *Houille Blanche*, numéro spécial A/1949 (Communication au Comité technique du 16 novembre 1948 de la Société Hydrotechnique de France).

I. — RAPPEL DES PRINCIPES DU DRAINAGE ÉLECTROSMOTIQUE

a) FILTRATION NATURELLE OU HYDRAULIQUE :

La loi de DARCY donne, pour expression du débit Q_h filtrant à travers un prisme de section droite brute A d'un sol perméable sous un gradient ou pente hydraulique i_h , la formule :

$$Q_h = k i_h A \quad (1)$$

k est le coefficient de perméabilité du sol, variable suivant la nature et la composition granulométrique du sol; voici quelques ordres de grandeur :

— Argile de Londres :	$k = 7 \times 10^{-9}$ cm/s
(très imperméable)	
— Limon sableux :	1×10^{-6} cm/s
— Limon grossier :	6×10^{-4} cm/s
— Sable fin :	3×10^{-3} cm/s

La perméabilité de la marne de Génissiat n'a pas été déterminée à notre connaissance; elle nous paraît être de l'ordre de celle de l'argile de Londres, c'est-à-dire très faible.

b) FILTRATION ÉLECTROSMOTIQUE :

Si, aux deux extrémités d'un faisceau de tubes capillaires parallèles (ou par extension d'un prisme de sol perméable) plongé dans l'eau, de section droite brute A , on place deux électrodes alimentées en courant continu sous une tension U (de sorte que le champ électrique en volts par cm de longueur L de l'échantillon soit $i_e = U/L$, on constate, en l'absence de tout gradient hydraulique préexistant, la formation d'un courant d'eau allant de l'anode (pôle +) à la cathode (pôle —) à travers l'échantillon poreux.

Le débit électrosmotique Q_e peut être mis sous la forme simple suivante (identique à la formule de DARCY) :

$$Q = k_e i_e A \quad (2)$$

k_e est le coefficient de perméabilité électroos-

motique caractéristique d'un terrain déterminé; il représente la vitesse de filtration obtenue dans ce terrain sous l'action d'un champ électrique i_e de 1 volt par cm, tout comme le coefficient de perméabilité de DARCY peut être interprété comme la vitesse de filtration naturelle de ce terrain sous un gradient hydraulique égal à 1 (1 cm par cm par exemple).

On trouvera dans notre étude « Application de l'électrosmose à l'exécution de certains travaux en terrains aquifères » la théorie du phénomène et les divers paramètres dont dépend le coefficient du débit électrosmotique k_e . En vue des applications, on peut admettre avec CASAGRANDE que dans tous les terrains pour lesquels le traitement électrosmotique peut être pratiquement appliqué, k_e est de l'ordre de 5×10^{-5} cm par seconde par volt/cm. En pratique, le champ électrique ne peut guère dépasser 0,5 volt par cm (*), de sorte que l'électrosmose conduit à des vitesses de filtration maxima de 2×10^{-5} cm/s. Si l'on compare ces valeurs de k_e et de $k_e i_e$ aux coefficients de perméabilité naturelle k_h , on voit que l'électrosmose est susceptible d'accroître très fortement le débit drainé à travers des argiles ($k = 7 \times 10^{-9}$ cm/s), des limons fins ($k = 1 \times 10^{-6}$ cm/s) ou même grossiers ($k = 6 \times 10^{-4}$ cm/s), mais — sauf si le gradient hydraulique est très petit — son influence sera faible, en valeur relative, dans le cas de terrains à grains plus gros — tels que le sable fin ($k = 3 \times 10^{-3}$) — qui ont naturellement un débit de filtration beaucoup plus élevé.

D'autre part, il faut remarquer que le champ des vitesses de filtration naturelle peut être différent de celui des vitesses électrosmotiques; le champ résultant sera voisin de celui obtenu par addition vectorielle des champs composants, ce qui tend en pratique à réduire l'efficacité théorique de l'électrosmose.

Dans les argiles compactes et autres terrains plus ou moins colloïdaux, il est possible que dans certains cas l'action du courant électrique crée ou agrandisse, à travers le massif à drainer un réseau de fissures qui facilite la filtration.

II. — LE DISPOSITIF D'ESSAI

a) CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE DRAINÉE (fig. 1) :

Le poste de Génissiat est établi sur une croupe glaciaire d'axe sensiblement N.-E.-S.O. présentant vers le S.O. une pente moyenne de 5 à

6 %; les deux versants nord et sud de la croupe, aux abords du poste, ont une pente moyenne de 20 %.

(*) Voir note page 783.

Le sol du poste et des environs est constitué, sur une épaisseur de 40 à 50 m, par de la marne glaciaire (ancienne moraine de fond) qui repose directement sur l'urgonien, avec parfois intercalation d'une couche d'alluvions du tertiaire. Le matériau a une texture très fine; il comporte 80 % de grains compris entre 1/100^e de mm et 1/1.000^e de mm.

tir du pied du talus (cote 410 à 415), comme l'indique la figure 1. Chaque forage est constitué par un tube d'acier de 100 mm de diamètre, percé sur toute sa longueur de trous en forme de rectangles très allongés. La longueur des forages varie de 80 à 130 m et leur distance à la surface du sol de 0 à une vingtaine de mètres. Le débit des drains s'écoule par gravité

FIG. 3. — Schéma de principe du débitmètre.

de coefficient de contraction m par la formule classique :

$$Q = m s \sqrt{2gh}$$

III. — PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS DU 15 MAI AU 15 JUIN; PÉRIODE SÈCHE

La première série d'essais a été effectuée en période relativement sèche, de façon que le débit dû à l'action électroosmotique soit grand par rapport au débit de filtration naturelle et puisse, de ce fait, être mesuré avec le maximum de précision.

Dix essais ont été exécutés en prenant comme cathode le drain D_2 et comme anode diverses combinaisons des deux groupes d'électrodes en tubes d'acier. Quatre autres essais ont été tentés en prenant comme anode divers puits filtrants existants et comme cathode un drain horizontal voisin.

L'appareil se compose essentiellement d'un cylindre de laiton A de 50 mm de diamètre et 0,80 m de hauteur, qui reçoit à sa partie inférieure le débit à mesurer convenablement « tranquilisé » et filtré. Un peu au-dessus du fond de ce cylindre se trouve une pièce de raccordement sur laquelle on vient visser un ajutage calibré de diamètre variable suivant la sensibilité désirée. Le débit de chacun de ces ajutages en fonction de la hauteur d'eau h dans le cylindre A est déterminé par pesée au laboratoire; on dresse ainsi les courbes d'étalonnage $Q = f(h)$, compte tenu éventuellement des corrections de température (ici négligeables).

L'enregistrement de h en fonction du temps se fait par l'intermédiaire d'une pointe suiveuse simplifiée, de 0,50 m de course, manœuvrée par un petit moteur commandé par deux « relais thyatron » R_1 et R_2 . Le palpeur est constitué par deux pointes métalliques p_1 et p_2 dont les extrémités sont décalées en hauteur de moins de 1 mm.

Lorsque p_1 est en contact avec l'eau et p_2 dans l'air, le moteur de commande de la tête mobile T (à laquelle est liée la plume de l'enregistreur) est au repos. Lorsque p_1 et p_2 sont immergées, le moteur se met en route dans le sens « montée » par le jeu du relais R_2 ; il agit dans le sens « descente » par l'action du relais R_1 lorsque p_1 et p_2 sont dans l'air. Ainsi la tête mobile est asservie au niveau du plan d'eau à 1 mm près. La précision de ce débitmètre convenablement étalonné est voisine de 1 % et sa robustesse, au cours des travaux sur le terrain, s'est révélée excellente (*).

La mise au point de cet appareil, ainsi que toutes les mesures sur le terrain, ont été assurées par M. TERRIER, ingénieur au Service des Etudes et Recherches Hydrauliques, que nous sommes heureux de remercier ici pour sa précieuse collaboration.

Les résultats généraux obtenus sont rassemblés dans le tableau 1. Nous nous bornerons à décrire en détail deux essais caractéristiques.

a) ESSAI N° 2 DU 18 MAI A 15 H. AU 22 MAI A 8 H. :

L'essai a débuté le 18 mai à 16 h. sous une tension continue de 91 volts (mesurés aux bor-

(*) Les relais « thyatron » pouvant commander un moteur de plusieurs chevaux, cet appareil s'adapterait facilement à diverses applications industrielles, notamment à l'enregistrement du niveau de l'eau dans les forages profonds.

TABLEAU I. — RÉCAPITULATION DES RÉSULTATS

Dates	Numéro des essais	Cathode	Anode	Tension moyenne	Intensité moyenne	Puissance moyenne	Débit		Durée de l'essai	Energie totale fournie	Volume total d'eau extrait	Consommation moy. en ampères-heure par litre	Résistance apparente entre les électrodes		Consommation spécifique globale en kWh/l	Consommation spécifique déduction faite des pertes dans les câbles
							avant traitement	après traitement					au début de l'essai	à la fin de l'essai		
				V	A	kW	l/h	l/h	h	kW/h	l	Ah/l	Ω	Ω	kWh/l	kWh/l
15 au 18 mai	n° 1	D2	G. I.	99	92,5	9,15	0,9	10,2	66	604	674	12,5	0,48	1,17	1,01	0,84
18 au 22 mai	n° 2	D2	G. S.	98	168,5	16,5	0,85	16,3	88	1.450	1.432	12	0,28	0,64	1,07	0,77
22 mai	n° 3	D2	G. S.	140	185	25,95	2	16,25	9,45	253	158,5	12,2	0,54	0,65	1,7	1,34
22 au 23 mai	n° 4	D2	G. S.	55	78,2	4,32	2,75	4,8	13	56,1	62,5	19,5	0,53	0,55	1,54	1,2
23 au 24 mai	n° 5	D2	G. S. 3' 4' 5' 6' de- connectées	100	58,4	5,84	1,7	4,44	22,3	131,5	100	19	0,90	1,68	1,7	1,54
24 au 27 mai	n° 6	D2	G. I. + G. S.	108	200	21,6	0,8	18,03	60	1.296	1.082	11,8	0,20	0,37	1,2	0,84
28 au 29 mai	n° 7	D2	G. I.	100	50,9	5,09	0,4	3,53	24	122,2	85	15	1,3	1,9	1,15	1,37
29 au 30 mai	n° 8	D2	G. S.	86,9	146	12,54	0,3	12,88	24,3	308,5	316,8	11,4	0,27	0,6	0,99	0,76
30 au 31 mai	n° 9	D2	Puits n° 16	122,7	62	7,6	0,7	4,53	21	159,2	95,1	15,5	0,85	2,35	1,98	1,84
3 au 6 juin	n° 10	D2	G. I. + G. S.	84	142,7	11,98	0,3	11,75	65	779	763,7	12,6	0,21	0,56	1,03	0,82
7 juin	n° 11	D3	Puits 12+5	95	50	4,75	2	6,46	50	237,5	323	11	2,06	1,61	1,06	0,98
9 au 10 juin	n° 12	D3	Puits 12+5	125	75,2	9,4	2	8,23	15	141	123,5	9,8	1,46	1,70	1,39	1,18
10 au 11 juin	n° 13	D1	Puits 2+6	112,9	82,6	9,32	1	10,94	15,2	140,1	167,4	8,4	1,25	1,18	0,98	0,84
11 au 13 juin	n° 14	D1	Puits 2+6	130	101,3	13,17	1	13,04	42	553	547,7	8,9	1,06	1,25	1,1	1,04

nes de la génératrice) entre le « groupe supérieur » d'anodes et le drain D₂ pris comme cathode; l'intensité absorbée était alors de 210 ampères.

La figure 4 donne la variation des paramètres principaux au cours des 88 heures d'essai.

Sous l'action de l'électroosmose, le débit du drain D₂ est passé progressivement de 0,85 l/h, débit initial (de filtration naturelle), à un maximum de 38 l/h qui a été atteint vers 22 h., soit 6 heures après la mise sous tension du dispositif. Ce débit a ensuite diminué rapidement pour atteindre vers 23 heures un minimum de 26 l/h, suivi d'un maximum relatif de 28 l/h. Ensuite, le débit du drain s'est abaissé lentement pour tomber aux environs de 12 l/h à la fin de l'essai, après 88 heures de traitement électroosmotique. Après coupure du courant, le débit est revenu à sa valeur initiale de 0,85 l/h en deux heu-

res environ. Les pluies survenues les 18, 19 et 22 mai n'ont pas eu d'influence sensible sur le débit naturel des drains voisins de D₂; absorbées par la végétation et le terrain assez sec, elles ont pourtant probablement modifié quelque peu sa résistance électrique et pourraient être la cause des ondulations à longue période que l'on observe sur la courbe des débits de la figure 4.

L'essai était conduit en principe à tension constante, mais par suite de certaines difficultés matérielles de réglage, la tension aux bornes de la génératrice a augmenté au cours de l'essai — corrélativement à la diminution de l'intensité débitée — de 91 à 104 volts. L'intensité est passée de 212 ampères au début de l'essai à 130 ampères à la fin, par suite de l'augmentation progressive de la résistance entre les électrodes de drainage.

Fig. 4. — Essai n° 2. — Groupe d'électrodes supérieur.
Cathode : Drain D2.

Nous avons appelé « résistance apparente » entre électrodes la valeur :

$$R = \frac{U}{I} - r$$

r étant la résistance électrique des câbles d'alimentation des électrodes,

U et I respectivement la tension et l'intensité aux bornes de la génératrice électrique.

Cette « résistance apparente » est passée de 0,28 ohm environ au début de l'essai à 0,64 ohm à la fin. Cette augmentation est due au dessèchement progressif du terrain; plus précisément, elle a sa source principale dans le dessèchement du sol, au voisinage immédiat des anodes; la résistance aux abords de la cathode vers laquelle afflue une plus grande quantité d'eau qu'en régime de filtration naturelle tend au contraire à diminuer.

Il est clair que la résistance R ci-dessus ne représente pas la résistance ohmique du terrain, car celui-ci est le siège de phénomènes de polarisation électrolytiques complexes. Pour tenter d'éliminer ces derniers, nous avons procédé à

une mesure en courant alternatif à 50 périodes de l'impédance Z entre les électrodes; nous avons trouvé vers la fin de l'essai : $Z \approx 0,2$ ohm.

La résistivité du terrain superficiel de Génissiat saturé d'eau, mesurée en courant alternatif sur un échantillon remanié de 15 cm $\times$ 15 cm $\times$ 30 cm, a été trouvée égale à 2.500 ω par cm^2 .

Au cours de 88 heures de traitement, il a été extrait du terrain, par électroosmose, 1.432 litres d'eau au prix d'une consommation de 1.450 kWh (courant continu). La consommation spécifique d'énergie, déduction faite des pertes dans les câbles d'alimentation des électrodes, ressort à 0,77 kWh par litre d'eau drainée (*).

Pour analyser le phénomène, il semble plus rationnel d'étudier la consommation spécifique en ampère-heure par litre d'eau extraite (déduction faite du débit de filtration naturelle). En

(*) L'énergie absorbée par l'électroosmose seule est beaucoup plus faible car le chiffre de 0,77 kWh/l comprend les pertes par électrolyse de l'eau et les « pertes Joule » dans le terrain; en estimant ces dernières à ZI^2 la consommation spécifique serait réduite de 40 % environ.

effet, reprenons la formule (2) donnant le débit électroosmotique dans un faisceau élémentaire de tubes capillaires parallèles à la direction du champ électrique :

$$Q = k_e I_e A \quad (2)$$

Pour un faisceau de longueur L assez faible pour que le champ électrique puisse être considéré comme uniforme sur toute sa longueur et égal à $I_e = (U/L)$, on aura, si R désigne la résistance électrique du faisceau et I l'intensité qui le traverse :

$$U = R I = \varphi \frac{L}{A} I$$

(φ étant la résistivité moyenne du faisceau et A sa section), d'où :

$$I_e = \frac{U}{L} = \varphi \frac{I}{A}$$

et :

$$Q = k_e \varphi I \quad (3)$$

La consommation spécifique en ampère/heure par litre sera :

$$\frac{I}{Q} = \frac{1}{k_e \varphi} \quad (4)$$

Si l'on passe, du cas schématique, d'un faisceau élémentaire de tubes capillaires à un massif de terrain soumis à l'électroosmose par un système d'électrodes déterminé, l'analyse du phénomène devient beaucoup plus difficile, mais les études et essais du Laboratoire de Zurich semblent montrer que le débit Q dû à l'électroosmose reste proportionnel à l'intensité I .

Donc, pour un dispositif d'essai déterminé, la consommation spécifique I/Q est constante si k_e et φ sont eux-mêmes invariables.

Dans le graphique relatif à chaque essai, nous avons fait figurer la courbe de la variation de la consommation spécifique I/Q en fonction du temps, au moins pour la partie de l'essai où le régime permanent peut être considéré comme atteint. Dans le cas de l'essai n° 2 par exemple, les vingt premières heures sont caractérisées par un débit électroosmotique très élevé; il n'est pas certain que le débit mesuré à un instant donné à l'extrémité aval du drain soit produit par l'intensité du courant mesurée au même instant, car la propagation du débit électroosmotique dans le terrain peut prendre un certain temps; peut-être pourrait-on expliquer de cette façon les deux pointes de débit qui marquent le début de l'essai en les assimilant à celles que donnent, sur les limnigrammes d'un cours d'eau,

les crues provenant de divers affluents (*); dans cette hypothèse, qui demanderait à être vérifiée, la première « pointe » représenterait l'afflux de débit provoqué à la mise sous tension au voisinage immédiat de la cathode, et la deuxième, celui obtenu à l'anode au même instant, mais qui n'atteint le train cathodique que six heures après. On peut aussi expliquer les variations de débit par les phénomènes de « blocage électrique » des pores signalés par M. L. COLLET. (Voir : *L'Osmose électrique*, Pub. scient. Min. de l'Air, 1950.)

Quoiqu'il en soit, la consommation spécifique I/Q s'est maintenue au voisinage de 12 ampères/heure par litre pendant la période de régime pseudo-permanent de l'essai n° 2. Pendant la dernière partie de l'essai, elle a augmenté progressivement jusqu'à 13 A/h/l. Au début de l'essai (régime transitoire?), elle est tombée à moins de 6 A/h/l, sa valeur moyenne pour les 88 heures d'essai est un peu supérieure à 10 A/h/l.

Grosso modo, la consommation I/Q croît avec la résistance apparente du terrain du début à la fin de l'essai. Ce résultat semble en contradiction avec la formule (4), mais il faut remarquer que le terrain est loin d'être homogène et que son dessèchement progressif peut entraîner une augmentation de A et une diminution du coefficient électroosmotique k_e supérieure à l'accroissement de la résistivité φ que révèle la montée progressive de la résistivité apparente.

(*) Le champ électrique dans le terrain est très inégalement réparti; il est maximum au voisinage immédiat des électrodes et décroît très rapidement au large de celles-ci. En milieu homogène indéfini, sur la ligne qui joint le centre de deux électrodes indéfinies, de diamètre d , distantes de a et soumises à une différence de potentiel U , il est donné en fonction de l'abscisse r du point considéré par la formule :

$$H = \frac{U}{2 \text{Log}(a/d)} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{a - r} \right]$$

Pour deux électrodes analogues à celles que nous avons utilisées, distantes de 6 m et alimentées sous 100 volts, cette formule donne approximativement :

$$H = 0,47 \text{ v : cm à } 0,25 \text{ m d'une électrode}$$

$$H = 0,25 \text{ v : cm à } 0,50 \text{ m d'une électrode}$$

$$H = 0,14 \text{ v : cm à } 1,00 \text{ m d'une électrode}$$

$$H = 0,07 \text{ v : cm à } 3,00 \text{ m d'une électrode}$$

Les vitesses électroosmotiques varient corrélativement entre 0,9 et 0,13 cm par heure (ordre de grandeur). Si la distance a entre les électrodes croît, le champ au voisinage immédiat de celles-ci varie peu, mais il s'affaiblit très vite au large. Au total, les effets d'électroosmose n'apparaîtront qu'autour des électrodes et seront insensibles dans la plus grande partie du terrain, laquelle n'est soumise qu'à de très faibles gradients de potentiel. Si l'ensemble du terrain est noyé dans la nappe phréatique, cette inégale répartition de l'effet électroosmotique n'a pas de conséquence hydraulique; il en est différemment si celle-ci n'existe pas et si l'humidité est due à l'eau absorbée par les particules du sol.

On peut résumer comme suit les caractéristiques et les résultats de l'essai n° 2 :

Anodes : Groupe supérieur d'électrodes.

Cathode : Drain D₂.

Durée de l'essai : 88 heures.

Tension en volts :

max. : 104 V min. : 90 V moy. : 98 V

Intensité :

max. : 212 A min. : 130 A moy. : 168 A

Débit initial de filtration naturelle : 0,85 l/h.

Débit avec traitement électroosmotique :

maximum : 38 l/h, minimum : 11 l/h
moyenne : 16,3 l/h

Consommation nette I/Q :

en régime : 12,5 A/h par litre
en moyenne : 10,3 A/h par litre

Résistance apparente entre électrodes :

au début de l'essai : 0,28 ω
à la fin de l'essai : 0,64 ω

REMARQUE. — La consommation en A/h ou en kWh par litre varie beaucoup du début à la fin d'un essai; pour caractériser aussi bien que possible ce paramètre important, nous avons donné dans le tableau ci-dessus la « consomma-

tion moyenne en A/h/l calculée sur toute la durée de l'essai et la « consommation en régime » pseudo-permanent vers le milieu de l'essai.

b) ESSAI N° 9 DU 30 MAI A 18 H AU 31 MAI A 15 H :

L'objet de cet essai était de tenter de réaliser par électroosmose un réseau de fissures reliant le puits 16 au drain D₂ afin d'évacuer vers ce dernier, par gravité, les débits pompés jusque-là avec quelque difficulté dans ledit puits.

Le drain D₂ formant cathode, on a pris comme anode le puits 16. Ce puits, constitué par un « tube crépiné » de 450 mm de diamètre, est implanté dans le voisinage immédiat du drain D₂ (voir fig. 1 et 2) au niveau duquel affleure son extrémité inférieure.

Au cours de l'essai, ce puits était pratiquement à sec; pour pouvoir faire l'expérience, il a été alimenté en eau de ville, de manière à maintenir son niveau constant à 1 m au-dessous de son débouché qui est à la cote 420 environ.

Les caractéristiques de cet essai et les résultats obtenus sont rassemblés dans la figure 5 et le tableau ci-après.

Durée de l'essai : 21 heures.

Tension en volts :

max : 127 min. : 118 moy. : 122,7

Intensité en ampères :

max. : 128 min. : 50; moy. : 62

FIG. 5. — Essai n° 9. — Anode : puits 16.

Cathode : Drain D₂.

Débit initial de filtration naturelle du drain D₂ :
0,7 l/h.

Débit pendant traitement électrosmotique
en l/h :

max : 6,7 minimum : 4 moy. : 4,53

Consommation en A/h par litre :

en régime : 15,5 en moyenne : 14

Résistance apparente entre électrodes en ohms :

au début de l'essai : 0,83

à la fin de l'essai : 2,35

La courbe du débit électrosmotique en fonction du temps présente une allure analogue à celle observée dans les essais précédents : forte pointe initiale suivie d'une décroissance, rapide d'abord, plus lente ensuite. La résistance croît rapidement en raison du faible volume de terrain traité et rapidement desséché par l'électrosmose. La consommation d'électricité, 14 à 15

A/h par litre, est assez élevée et comparable à celle obtenue par l'essai n° 7. Le débit électrosmotique initial est limité par la résistance de l'anode qui ne permet pas de dépasser une intensité de 130 A sous la tension utilisée; d'autre part, le terrain soumis à l'expérience était déjà bien déshydraté par les essais précédents et l'alimentation artificielle en eau du puits 16 n'a peut-être pas beaucoup modifié son humidité.

Après coupure du courant, le débit du drain retombe rapidement à sa valeur initiale.

Il semble donc qu'on ne peut compter sur le traitement électrosmotique pour créer ou agrandir un réseau de fissures qui subsisterait un temps appréciable après suppression du courant, augmentant ainsi d'une façon permanente le taux de filtration naturelle du terrain. Dans certains terrains, le tassement produit par le drainage électrosmotique peut même réduire, au moins temporairement, la perméabilité du milieu.

FIG. 6. — Essai n° 8. — Anode : Groupe supérieur d'électrodes.

Cathode : Drain D2.

Fac-similé de l'enregistrement du débitmètre.

c) AUTRES ESSAIS :

Afin de ne pas alourdir cet exposé, nous nous bornerons à commenter brièvement les résultats rassemblés dans le tableau 1.

On voit que les consommations d'électricité observées « en régime » en utilisant le drain D_2 comme cathode et diverses combinaisons des deux groupes d'anodes se groupent pour la plupart autour d'une valeur médiane voisine de 12 A/h par litre d'eau drainée. Le chiffre de 19,5 A/h par litre obtenu pour l'essai n° 4 peut s'expliquer par la trop faible tension d'alimentation (55 V) des électrodes. Celui à peine plus faible donné par l'essai n° 5 est dû au fait que 4 des 8 électrodes du groupe supérieur avaient été déconnectées; la zone de terrain intéressée par l'électrosmose s'en trouve réduite, ainsi que le montre la forte augmentation de la résistance électrique entre anode et cathode.

La consommation de 15 A/h par litre de l'essai n° 7 s'explique par le dessèchement très visible — et confirmé par l'augmentation de la résistance électrique — du terrain dans la zone du groupe inférieur d'anode, du fait des traitements électrosmotiques précédents.

Pour une même consommation en A/h par litre, la dépense d'énergie en kWh par litre croît avec l'intensité (donc avec la tension pour un sys-

tème d'électrodes déterminé) et avec la résistance du terrain sous l'effet des pertes Joule (à peu près proportionnelles à $R I^2$) dans ce dernier.

Les essais exécutés en prenant comme anode les puits filtrants verticaux existants donnent des consommations en A/h par litre plus faibles que celles ci-dessus, peut-être par suite d'une répartition plus favorable et d'une valeur plus grande du champ électrique.

REMARQUE. — Il est à noter que le débit instantané au cours du drainage électrosmotique est loin d'être régulier. Il présente, ainsi que le montre le fac-similé d'enregistrement au débitmètre de la figure 6, une série de pulsations assez régulières dont la pseudo-période varie de une heure à une heure et demie. Nous avons vérifié que ces pulsations ne proviennent pas du débitmètre lui-même. On peut les attribuer aux phénomènes de polarisation électrique à l'intérieur des terres, aux bulles gazeuses qui entourent les électrodes, à l'ouverture et à la fermeture successives des fissures du terrain, etc... CASAGRANDE avait déjà observé au laboratoire que le champ électrique était instable dans un échantillon de terrain électrosmosé sous tension constante. Les eaux drainées par électrosmose donnent un léger dépôt blanchâtre (sels de calcium) qui n'a pas été observé dans les eaux de filtration naturelle.

IV. — DEUXIÈME SÉRIE D'ESSAIS DU 22 AU 29 NOVEMBRE 1950; PÉRIODE PLUVIEUSE

La première série d'essais avait montré que la consommation spécifique d'énergie du processus d'électrosmose était fortement influencée par la résistance électrique du terrain, elle-même liée à la teneur en eau de ce dernier. Pour préciser ce point, il fut donc décidé de procéder à une nouvelle série d'essais durant une période où le terrain était saturé d'eau par les pluies.

La mesure de la partie du débit des drains dû à l'électrosmose se complique alors du fait que le débit de filtration naturelle durant les périodes pluvieuses est fort variable et d'un ordre de grandeur supérieur ou égal au débit électrosmotique. On a pu pourtant estimer à chaque instant le débit naturel du drain D_2 en établissant, en l'absence d'électrosmose, sa corrélation pendant une assez longue période avec les drains voisins D_1 et D_3 (voir fig. 1).

a) ESSAI N° 1 DU 22 AU 24 NOVEMBRE :

Le drain D_2 formant toujours cathode, on a pris comme anode le groupe supérieur d'électrodes.

Au début du traitement électrosmotique, le 22 vers 11 heures, le drain D_2 était en crue (et près de l'étalement) à la suite des pluies tombées la veille (10,6 mm) et l'avant-veille (5,6 mm); son débit était de 138 l/h (fig. 7). Une heure environ après la mise sous tension des électrodes qui absorbaient alors 220 A sous 99 V, il a atteint un maximum de 220 l/h pour tomber ensuite assez rapidement vers 140 l/h le 22 à 18 h et remonter à 152 l/h vers 22 h. Il décroît ensuite jusqu'à la fin de l'essai, toujours influencé à la fois par le temps pluvieux qui a persisté pendant toute la durée de l'essai et par les variations de l'intensité du courant électrique liées à l'augmentation progressive de la résistance du terrain.

Les diagrammes de la figure 7 rassemblent les éléments essentiels de cette expérience dont les résultats peuvent être résumés comme suit :

Durée totale de l'essai : 43 heures

Débit initial de filtration naturelle : 138 l/h

Intensité moyenne : 168 ampères

Débit total : filtration naturelle + électrosmose :
maximum : 220 l/h moyen : 103,1 l/h

FIG. 7. — Essai n° 1. — Anode : Groupe supérieur d'électrodes.

Cathode : Drain D2.

Débit dû à l'électrosmose seule :

maximum : 82 l/h moyen : 30,1 l/h

Consommation moyenne : 6 A/h par litre**Résistance apparente entre électrodes :**

au début de l'essai : 0,43 ohm

à la fin de l'essai : 0,76 ohm

Nous avons fait figurer dans le diagramme de la figure 7 la résistance de l'anode d'une part et de la cathode d'autre part, mesurées par la méthode classique utilisée pour les « terres » de sécurité des installations électriques. On voit que la résistance de la cathode ne varie pas, tandis que celle de l'anode croît constamment du fait du dessèchement progressif du terrain qui l'environne (*).

Les dispositions adoptées dans cet essai étant identiques à celles réalisées dans l'essai n° 2

(*) Pour certaines applications, il est possible qu'il soit avantageux d'empêcher ce dessèchement en injectant une solution salée dans les tubes constituant l'anode.

décrit au paragraphe III ci-dessus, on doit conclure que lorsque le terrain de Génissiat est saturé d'eau, la consommation spécifique en A/h par litre est réduite à la moitié environ de sa valeur en période sèche. Mais alors que dans ce dernier cas le débit d'électrosmose est largement prépondérant, en période pluvieuse il représente — dans les conditions de nos expériences — une fraction assez faible du débit total.

b) ESSAI N° 3 DU 27 AU 29 NOVEMBRE :

Les conditions de cet essai ne diffèrent de celles de l'essai n° 1 qu'en ce que l'anode est ici constituée par les deux groupes supérieurs et inférieurs d'électrodes reliés en parallèle.

Les résultats de cet essai rassemblés dans les diagrammes de la figure 8 peuvent être résumés comme suit :

Durée totale de l'essai : 44 heures**Débit initial de filtration naturelle :** 57 l/h

FIG. 8. — Essai n° 3. — Anode : 2 groupes d'électrodes en parallèle.
Cathode : Drain D2.

Intensité moyenne : 205 ampères

Débit total : filtration naturelle + électroosmose :
maximum : 126 l/h moyen : 82,5 l/h

Débit dû à l'électroosmose seule :
maximum : 48 l/h moyen : 31,6 l/h

Consommation moyenne : 7 A/h par litre d'eau extraite.

Résistance apparente entre électrodes :
au début de l'essai : 0,33 ohm
à la fin de l'essai : 0,51 ohm

Il est remarquable que dans cet essai le débit dû à l'électroosmose se maintienne relativement constant malgré les amplitudes variations du débit de filtration naturelle; la pointe de débit consécutive au début du traitement électroosmotique est elle-même très faible. Cela laisse supposer que la forte valeur de cette pointe constatée au cours des essais effectués en période sèche est due au fait qu'avec les intensités de courant utilisées l'électroosmose dessèche assez rapidement le terrain aux abords des anodes et même des catho-

des; on obtiendrait probablement des consommations spécifiques plus avantageuses en opérant avec des intensités de courant suffisamment faibles pour que la pointe initiale de débit soit très atténuée.

REMARQUE. — Un essai de 18 heures a été tenté (les 25 et 26 novembre) en prenant comme cathode le drain D₂ et comme anode la terre excellente, mais éloignée de quelques centaines de mètres, du poste de Génissiat. Sous un courant d'une intensité moyenne de 210 A, on a obtenu une consommation spécifique un peu supérieure à 15 A/h par litre d'eau extraite, malgré l'état de saturation du terrain comparable à celui réalisé au cours des deux essais analysés ci-dessus.

Ce doublement de la consommation spécifique est dû, croyons-nous, à la valeur plus faible et à la répartition moins favorable du champ électrique. On sait que celui-ci n'est important qu'au voisinage immédiat des électrodes. Dans notre expérience, seul le champ au voisinage de la ca-

thode — qui comprend ici toute la longueur du drain D_2 — était effectivement utilisé au drainage évacué par le drain D_2 ; le champ autour de la terre générale du poste de Génissiat était trop éloigné pour concourir efficacement à augmenter le débit de ce drain.

V. — TROISIÈME SÉRIE D'ESSAIS DU 8 AU 10 MAI 1951; DRAINAGE ÉLECTROOSMOTIQUE EN RÉGIME DISCONTINU

Les deux séries d'essais précédentes avaient montré que le début du traitement électroosmotique est toujours marqué par une pointe de débit plus ou moins accusée qui correspond à une consommation spécifique particulièrement avantageuse (souvent moins de 5 A/h par litre contre 12 et 6 « en régime » respectivement en période sèche et en période humide).

La diminution du rendement au fur et à mesure que l'opération se poursuit est probablement due en majeure partie à l'augmentation progressive de la résistance apparente du terrain; on pouvait penser que celle-ci était liée non seulement au dessèchement du terrain, mais aussi à des phénomènes de polarisation dans le terrain, en particulier au voisinage des électrodes.

Pour tenter de diminuer ces phénomènes hypothétiques, il fut procédé à un essai de drainage électroosmotique en régime discontinu. A cet effet, le drain D_2 formant toujours cathode,

En définitive, cet essai montre l'importance d'une disposition judicieuse des anodes par rapport aux cathodes; des essais sur modèle à la cuve électrique doivent permettre l'étude, dans chaque cas particulier, de ce point important.

l'anode fut constituée par les deux groupes d'électrodes en parallèle (montage identique à celui réalisé pour l'essai n° 3 décrit au paragraphe IV ci-dessus).

La figure 9 rassemble les résultats de cet essai. Le traitement électroosmotique, commencé le 8 mai à 18 heures, fut interrompu au bout de 14 heures pendant 4 heures, puis repris pendant 4 heures, et ainsi de suite comme le montrent les diagrammes de la figure 9.

Dès la mise sous tension des électrodes, le débit du drain D_2 passe très rapidement de 2,25 à 64 l/h, puis décroît progressivement pour tomber en 14 heures à 24 l/h. L'interruption du courant électrique ramène le débit du drain à celui correspondant à la filtration naturelle en deux à trois heures. La remise sous tension des électrodes, à ce moment, fait croître très vite le débit qui plafonne bientôt à une valeur inférieure à celle qu'il aurait atteint si le traitement électro-

FIG. 9. — Essais de drainage électroosmotique en régime discontinu.

osmotique n'avait pas été interrompu; on n'observe pas la pointe de débit très marquée qui suit la première mise sous tension des électrodes. On notera dans les diagrammes de la figure 9 la variation relativement rapide de l'intensité absorbée et de la résistance apparente du terrain à chaque reprise de l'électroosmose.

Les résultats principaux de cet essai peuvent être résumés comme suit :

Durée totale de l'essai : 48 heures

Durée nette du traitement électroosmotique :
35,30 h

Débit initial de filtration naturelle : 2,25 l/h

Débit moyen pendant le traitement électroosmotique : 23 l/h

Consommation moyenne en A/h par litre : 8,7

Energie nette en kWh/l : 0,684

Aux erreurs expérimentales près, la consommation spécifique d'énergie est sensiblement égale à celle que l'on obtiendrait par un traitement électroosmotique continu. Il serait intéressant de rechercher le temps minimum d'interruption du traitement électroosmotique qui est indispensable pour faire réapparaître la « pointe de débit » initiale.

CONCLUSION

Nos essais ont montré que les terrains du talus nord du poste de Génissiat se prêtaient assez bien au traitement électroosmotique. Les consommations moyennes enregistrées se groupent autour de 12 A/h par litre d'eau extraite en période sèche et tombent vers la moitié de ce chiffre lorsque le sol est imbibé d'eau par les pluies. L'existence d'une forte pointe de débit

au début de chaque traitement électroosmotique semble montrer qu'il serait possible de réduire sensiblement la consommation d'énergie par un groupement judicieux des électrodes et la recherche de l'intensité optimum du courant, compte tenu de la plus ou moins grande humidité du terrain.

DISCUSSION

(Président : M. GABRIEL)

M. le Président remercie M. RÉMÉNÉRAS de ce remarquable exposé d'un essai qui, à cette échelle, lui paraît être le premier du genre.

Sur sa demande, M. RÉMÉNÉRAS indique que, dans les essais qu'il a décrits, le traitement électroosmotique avait pour but de renforcer l'effet du réseau de drainage existant, lequel était destiné :

- a) A renverser le sens des « pressions de courant » qui tendent à provoquer le glissement des terrains;
- b) A augmenter la résistance mécanique propre des terres en réduisant leur teneur en eau.

Le drainage électroosmotique a trouvé ses principales applications dans l'exécution de fouilles profondes en terrains bouillants peu perméables et à grains très fins tels que les loess, les limons et certaines argiles glaciaires; il a été notamment utilisé en Russie pour le percement du canal Lénine.

En réponse à M. FERRANDON, M. RÉMÉNÉRAS indique qu'il n'a pas été procédé à la mesure de la perméabilité du terrain suivant différentes directions; peut-être pourrait-on tenter de déduire les coefficients de perméabilité correspondants du débit de filtration obtenu en appliquant successivement l'action électroosmotique suivant diverses directions.

M. FERRANDON pense d'ailleurs que la généralisation aux milieux anisotropes de la loi de Darcy qu'il a donnée naguère (Congrès de la Mécanique des Sols, Rotterdam, 1948) par l'introduction d'un tenseur symétrique du second ordre $\bar{K}$ se substituant au coefficient de perméabilité K du cas isotrope, s'applique *mutatis*

mutandi au phénomène de l'électroosmose à l'égard duquel la matière présenterait ainsi en tout point trois directions principales préférentielles et dont la loi fondamentale pourrait se mettre sous la forme $\bar{V} = K \text{ grad. } U$ ($\bar{V}$, vitesse de filtration, U , potentiel électrique, K , tenseur symétrique du second ordre). Il rappelle toutefois que la généralisation en cause suppose légitime l'assimilation d'un milieu filtrant granulaire à un complexe de tube de filtrations.

Sur une question de M. le Président, M. RÉMÉNÉRAS fait connaître que ses essais sur l'électroosmose ne seront poursuivis que dans la mesure où se présenteront des applications industrielles de ce procédé.

M. AILLERET pense toutefois qu'il y aurait intérêt à reprendre ces essais sur un terrain expérimental convenable et à des régimes électriques plus bas, qui auraient sans doute l'avantage de réduire la consommation d'électricité puisque le débit d'eau extrait est proportionnel à l'intensité du courant électrique, tandis que la puissance consommée est proportionnelle au carré de cette intensité. Le rendement de l'opération est donc en raison inverse de l'intensité.

M. RÉMÉNÉRAS observe qu'avec de faibles intensités la durée de l'opération, pour un même volume d'eau extrait, serait augmentée; d'autre part, le renversement des « pressions de courant » dans le terrain ne peut être obtenu que si le débit de filtration électroosmotique est une fraction assez importante du débit de filtration naturelle.

M. AILLERET précise, d'autre part, que les pertes en

lignes qui représentent une part importante de l'énergie consommée seront réduites proportionnellement au carré de l'intensité du courant.

M. RÉMÉNIÉRAS signale que certains essais, exécutés successivement en courant continu et en courant alternatif, semblent montrer l'existence de forces contre électromotrices notables dues probablement à des phénomènes de polarisation; le problème est rendu plus complexe du fait que le tracé des lignes de courant (électrique) n'est pas le même en courant continu et en courant alternatif.

M. AILLERET estime d'autre part qu'il y aurait intérêt à disposer les anodes non à proximité du drain mais à l'infini; ce procédé aurait l'inconvénient de perdre les pressions hydrostatiques engendrées au voisinage de l'anode, mais par contre l'avantage de réduire l'énergie consommée au voisinage de celle-ci. Tout compte fait, la dépense en kWh serait fortement réduite, théoriquement divisée par deux.

M. RÉMÉNIÉRAS rappelle que les consommations obtenues au cours des essais en prenant comme anode la terre excellente du poste de Génissiat sont plus fortes que celles réalisées avec les anodes implantées à proximité du drain D_2 ; cela peut provenir du fait que les

résistances de ces deux types d'anodes étaient ici peu différentes et que les pressions électroosmotiques créées au voisinage de la terre du poste n'intervenaient pas pour augmenter le débit du drain D_2 .

M. AILLERET estime que, de toute façon, il serait intéressant de reprendre ces expériences sur un terrain moins complexe que celui de Génissiat et en utilisant une seule cathode avec anode à l'infini.

Sur la demande de M. AILLERET, M. RÉMÉNIÉRAS indique que les inversions de polarité des électrodes, tentées en vue de réduire les phénomènes de polarisation, n'ont donné aucun résultat.

M. BARRILLOX pense qu'il serait bon d'examiner l'eau débitée par le drain en régime de filtration naturelle et de filtration électroosmotique, afin de se rendre compte de l'importance et de la nature du dépôt qu'elle donne par décantation.

M. le Président conclut en soulignant l'intérêt de cet exposé et de la discussion qui l'a suivi et souhaite que de nouveaux essais sur ce sujet puissent faire l'objet d'une communication aux prochaines Journées de l'Hydraulique.

Séance levée à 18 h 35.