Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 94 (1968)

Heft: 1

Artikel: Applications et essais dans le domaine de l'électro-osmose des terrains sableux et argileux

Autor: Caron, C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69620

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

94e année Lausanne, 13 janvier 1968 N° 1

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; J. Favre, arch.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION
D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua, architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro . . .	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande » N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à : Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 450.—
1/2 »	» 235.—
1/4 »	» 120.—
1/8 »	» 62.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Applications et essais dans le domaine de l'électro-osmose des terrains sableux et argileux, par M. C. Caron, docteur-ingénieur.
Le nouveau Bureau fédéral des poids et mesures suisse (BfPM).
Bibliographie. — Divers. — Les congrès.
Documentation du bâtiment. — Documentation générale. — Informations diverses.

APPLICATIONS ET ESSAIS DANS LE DOMAINE DE L'ÉLECTRO-OSMOSE DES TERRAINS SABLEUX ET ARGILEUX

par C. CARON, docteur-ingénieur [1]

I. Procédés de consolidation des sols

On sait que l'on peut accroître les caractéristiques mécaniques des sols par drainage ou par injection, c'est-à-dire dans le premier cas en retirant de l'eau et dans le second en remplaçant l'eau interstitielle par un coulis qui deviendra solide au bout d'un certain temps.

Pour que cette opération soit possible (extraction d'eau ou injection d'un coulis fluide), il faut évidemment que le terrain ait une perméabilité suffisante.

La puissance du drainage devra être d'autant plus forte que le terrain est plus fin. On estime que, pour des terrains de perméabilité inférieure à 10^{-5} cm/sec, tout drainage devient inefficace.

Dans le cas de l'injection, on utilisera des coulis d'autant moins visqueux que le terrain est plus fin. A la limite, on aura donc recours à des monomères organiques dissous en phase aqueuse dont la viscosité est voisine de celle de l'eau pure. On peut ainsi traiter efficacement des terrains ayant une perméabilité de 10^{-5} à 10^{-6} cm/sec.

Lorsque le terrain est pratiquement étanche, c'est-à-dire avec une perméabilité inférieure à 10^{-5}, 10^{-6} cm/sec (sable limoneux, limon, vase, argile, etc.), l'injection du coulis ou l'expulsion d'eau par drainage deviennent impossibles.

Par des méthodes électriques, on peut encore consolider de tels terrains, soit en expulsant de l'eau (électro-drainage ou électro-osmose) soit en y « injectant » des ions (injection électro-chimique ou électro-consolidation).

II. Historique et théorie de l'électro-osmose

Un liquide peut se déplacer à travers une paroi semi-perméable, sans apport de force extérieure. C'est le phénomène d'osmose observé pour la première fois par La Hire en 1668. De même, un liquide peut se déplacer à travers une paroi poreuse quelconque, même si elle n'est pas semi-perméable, à condition de le soumettre

[1] Communication présentée le 20 octobre 1967, à Zurich, devant les membres de la *Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondations.* (Réd.).

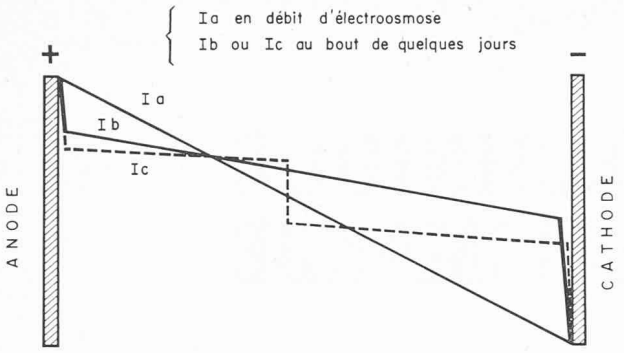

Fig. 1. — Evolution des potentiels en cours d'électro-osmose.

à un champ électrique. C'est le phénomène d'électro-osmose découvert dans les argiles par F. Reuss en 1809.

C'est Casagrande qui étudia la variation du débit en fonction du gradient hydraulique. La loi qu'il établit est très simple :

$$Q = \frac{K_e \ SV}{L}$$

dans laquelle :

Q est le débit d'eau déplacé par électro-osmose ;
K_e est la constante de perméabilité électro-osmotique ;
S est la section de l'échantillon ;
$\frac{V}{L}$ est le gradient de voltage.

Le coefficient de perméabilité électro-osmotique déterminé par Casagrande, puis par Schaad et Haefeli, est relativement constant puisque sur des matériaux aussi différents que des argiles, des limons, des silts et des sables, il ne variait que de 0,41 à $0{,}68 \cdot 10^{-4}$ cm/sec, avec une moyenne de $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ cm/sec pour un gradient unitaire.

Cette migration de l'eau de l'anode vers la cathode conduit à une consolidation du terrain argileux, consolidation qui a été mise par exemple à profit pour assurer la stabilisation de talus.

Le passage du courant électrique dans l'argile a donc pour effet principal de drainer l'eau (électro-osmose) mais, en même temps, il se produit une transformation chimique de l'argile (par électrolyse et adsorption d'ions), transformation qui augmente ou diminue la résistance du terrain. Lorsque, par certains artifices, on parvient à augmenter la résistance de l'argile à teneur en eau constante, c'est-à-dire sans drainage, on dit que l'on a affaire à une électroconsolidation.

Il est bien évident que l'on ne peut séparer les deux phénomènes de drainage d'une part d'électrolyse et de permutation d'ions d'autre part, puisque tous deux proviennent du passage du courant électrique.

Des études expérimentales plus poussées ont montré que l'on pouvait cependant influer le phénomène dans un sens ou dans un autre. Ceci a des conséquences pratiques importantes. En effet, les modifications par drainage électro-osmotique ne sont pas permanentes, puisque l'argile reprendra sa teneur en eau initiale lorsqu'elle ne sera plus soumise au champ électrique alors qu'au contraire, les modifications par permutation ionique sont pratiquement irréversibles. En conséquence, on aura intérêt à favoriser l'électro-osmose simple dans le cas d'un ouvrage provisoire et au contraire à favoriser l'électroconsolidation dans le cas d'un ouvrage définitif.

III. Etude de l'électro-osmose

On s'est aperçu en chantier que les débits drainés diminuaient rapidement dans le temps. On pouvait penser que l'argile, devenant plus sèche, avait moins de facilité pour expulser son eau interstitielle. Ceci est exact mais insuffisant comme explication. En effet, même si on alimente continuellement en eau à l'anode, les débits décroissent dans le temps. Ceci tient à ce que la répartition du potentiel, tout au long de l'échantillon, cesse rapidement d'être linéaire (graphique I_a). On a des cassures du type I_b ou I_c.

Il a été trouvé expérimentalement que les débits drainés suivaient à peu près la loi de Casagrande, à condition de prendre comme gradient hydraulique le plus faible observé dans l'échantillon (comparaison des graphiques II_a expérimental et II_b calculé à partir de la formule de Casagrande).

Comme la consommation de courant électrique diminue peu, le coût du litre d'eau drainée augmente rapidement et l'on a intérêt à arrêter le drainage lorsqu'il devient prohibitif. Si la consolidation ainsi acquise n'est pas jugée suffisante ou si l'on désire que cette consolidation soit permanente, il faudra recourir à des systèmes par électroconsolidation.

IV. Etude de l'électroconsolidation

L'électroconsolidation provient d'une modification de l'argile par permutation ionique. A teneur en eau constante, la cohésion d'une argile dépendra de la nature des ions périphériques (Na^+, NH_4^+, Ca^+, H^+, etc.).

Ces permutations ont différentes causes :

a) *Electrolyse de l'argile elle-même*

Les cations de l'argile vont migrer vers la cathode, mais étant très adsorbables, seule une partie de ces cations arrivera à la cathode. Le reste sera, par permutation ionique, adsorbé dans la partie cathodique de l'échantillon. Inversement, les anions vont migrer vers l'anode ; ils seront peu adsorbés lors de ce transfert. Par électrolyse, l'argile est donc partiellement désionisée et permutée.

b) *Par dissolution des électrodes*

Lorsque les électrodes sont constituées d'ions facilement adsorbables, ceux-ci pourront se fixer sur l'argile. C'est le cas par exemple des anodes métalliques qui se dissolvent progressivement et sont adsorbées par l'argile, ce qui peut conduire à des modifications intéressantes de celle-ci. On constate ainsi que les ions Al^{+++} augmentent, à teneur en eau constante, la résistance au cisaillement de l'argile. En revanche, les ions Fe^{+++} ont un effet plutôt néfaste.

J. Florentin a montré que cette augmentation de résistance était due à une augmentation des limites d'Atterberg, phénomène que nous avons vérifié par la suite sur d'autres types d'argile et avec d'autres ions. Cette modification des limites de liquidité, plasticité et retrait existe non seulement avec les argiles à capacité d'échange de base élevée (montmorillonite, illite ...) mais

aussi avec celles qui ont peu d'ions périphériques (kaolinite, par exemple).

Cette consolidation, par dissolution des électrodes, est intéressante mais présente deux inconvénients :

— la dissolution d'anodes en aluminium revient très cher ;

— par suite d'une réduction de section de l'anode, le contact avec le terrain est mal assuré et entraîne une déperdition inutile de courant. Signalons qu'on peut y remédier par certains artifices.

Ces deux inconvénients nous ont fait penser à utiliser des anodes liquides. Le courant électrique est évidemment amené par une anode métallique que l'on choisit inattaquable ou en métal bon marché et l'apport d'ions bénéfiques est assuré par un liquide entourant l'anode. Le contact avec le terrain est toujours parfait puisqu'il suffit de rajouter quelques litres de ce liquide au fur et à mesure de l'électrolyse.

De nombreux ions ont été essayés. Avec les argiles du bassin parisien ayant servi à nos essais (kaolinite ayant comme principale impureté l'oxyde de fer), les meilleurs résultats ont été obtenus avec le chlorure d'ammonium.

J.-C. Ott ainsi que F. P. Jaeklin ont, en revanche, donné la préférence au chlorure de calcium dans le cas d'argiles glaciaires suisses.

Enfin, dans des études américaines, on trouve mentionnés les sels de lithium.

De nombreuses études sont encore à réaliser à ce sujet et il semble bien qu'il n'y ait pas d'ion universel. Il faut, dans chaque cas précis, trouver celui qui conduit à la meilleure consolidation, au moindre prix.

Il a été constaté également que cette consolidation n'était pas uniforme tout au long de l'échantillon, ceci quelle que soit la nature de l'argile et de l'ion permutant. Un exemple est donné par le graphique III. Le sol à consolider était un « remanié » d'argile du bassin parisien (cohésion 5 g/cm²) et l'anode liquide du chlorure d'ammonium en solution aqueuse.

Le choix de l'ion permutant doit donc viser non seulement à assurer les meilleures cohésions mais aussi à augmenter la longueur de la zone consolidée.

Les méthodes par électroconsolidation sont donc très séduisantes mais elles demandent une étude préliminaire en laboratoire pour déterminer l'ion optimum.

Les quelques exemples qui suivent montrent des réalisations en grand. La première concerne une électro-osmose simple sans migration d'ion, les deux autres, une électroconsolidation.

V. Applications

Station d'épuration de Bordeaux

Maître d'œuvre : les Chantiers Modernes.

L'exécution des fouilles du dessableur et de la station élévatoire, dans des argiles et vases de faible cohésion, a été effectuée après consolidation électro-osmotique de ces terrains.

Comme il s'agissait d'une consolidation provisoire, on a utilisé la méthode d'électrodrainage sans apport d'ion (sauf sur quelques anodes où il fut injecté, à titre d'essai, des solutions de nitrate ou chlorure d'ammonium).

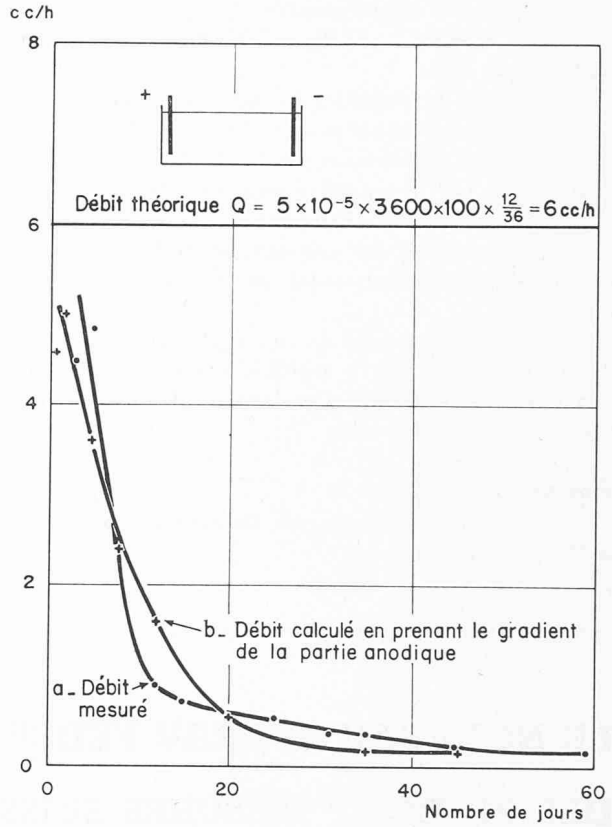

Fig. 2. — Evolution des débits en cours d'électro-osmose.

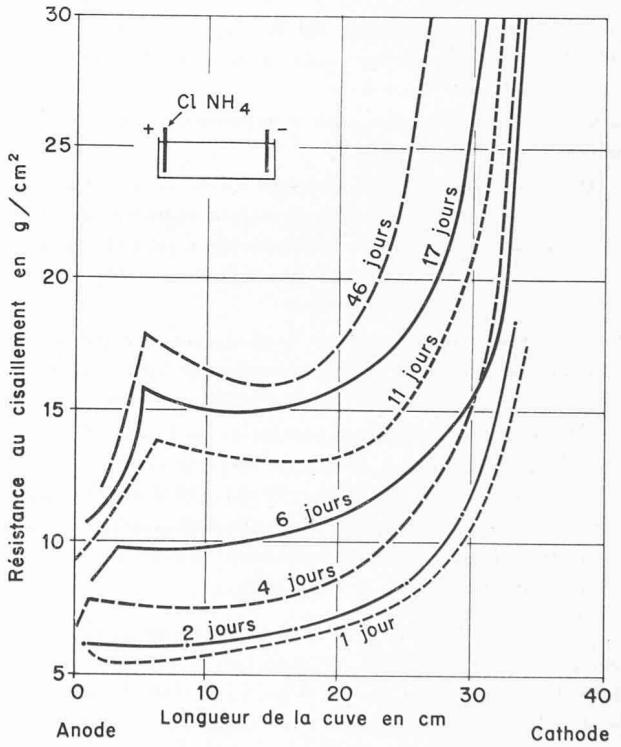

Fig. 3. — Electroconsolidation.

Pour assécher 1600 m³ de terrain jusqu'à une profondeur de 9 mètres, la consommation d'énergie a été de 3700 KW/h, c'est-à-dire 2,3 KW/h par m³ de terrain.

Les fouilles purent ainsi être exécutées pratiquement à la verticale, ce qui n'aurait pu être le cas sans traitement préalable.

Aménagement de Monteynard

Maître d'œuvre : EDF — Région d'équipement hydraulique Alpes I.

Il s'agissait de stabiliser les talus argileux créés par l'exécution de la route d'accès de l'usine de Monteynard.

La stabilité de certains de ces talus s'était trouvée compromise par le ramollissement de l'argile sous l'action des eaux de ruissellement.

On y a remédié en utilisant les techniques de la consolidation électrochimique par le chlorure d'ammonium.

La cohésion naturelle de ces argiles était de l'ordre de 1000 g/cm². Après le traitement, celle-ci est passée aux environs de 10 000 g/cm², assurant ainsi la stabilité permanente des talus.

Port terminal de Tunis

Maître d'œuvre : Compagnie Industrielle des Pétroles d'Afrique du Nord.

La construction de réservoirs à pétrole sur les formations non consolidées de vases du lac de Tunis a posé des problèmes délicats de fondation qui ont en partie été résolus au moyen de la consolidation électrochimique. Il a également été réalisé des drains de sable.

Vingt forages ont été équipés en anodes et cathodes jusqu'à la profondeur de 15 mètres. Comme il s'agissait d'une consolidation permanente, les anodes baignaient dans une solution de chlorure d'ammonium.

L'évolution de la cohésion était mesurée au fur et à mesure de l'avancement du traitement par un pénétromètre statique disposé au centre du plot.

Pour une quantité de courant de 800 ampères/heure par m³ de terrain, la cohésion initiale est portée, de façon irréversible, de 60 à 155 g/cm². D'après le coefficient de consolidation tel qu'il est défini par Terzaghi, les tassements éventuels, sous des conditions de charge bien déterminées et identiques, sont devenus de dix à seize fois moins forts après le traitement.

LE NOUVEAU BUREAU FÉDÉRAL DES POIDS ET MESURES SUISSE (BfPM)

La conception générale est fondée sur la base légale de la loi fédérale sur les poids et mesures de 1909/1958. Cependant, vu l'ampleur et le développement des sciences métrologiques, des compromis se sont avérés nécessaires car :

1° un petit pays est partagé entre la tentation de vouloir réaliser un programme culturel analogue à celui des grandes puissances et celle de se résigner en affaiblissant par cela son indépendance scientifique et technique ;

2° la tâche principale fut tout d'abord de trouver le juste milieu en ce qui concerne les limites qualitatives et quantitatives données a priori ;

3° d'une part, certaines parties de bâtiments devaient être adaptées à des buts déterminés et, d'autre part, le domaine d'activité du BfPM étant soumis à certaines fluctuations, il fallait disposer de locaux normalisés pouvant servir à différents travaux d'ordre général.

Il incombe à notre génération de rendre hommage à ceux qui, en 1909 déjà, se sont rendu compte qu'il ne faut pas séparer la partie administrative de la partie métrologique (laboratoires). Le BfPM s'occupe donc, depuis sa création en 1909, non seulement des étalons mais aussi de l'approbation théorique et pratique des instruments de mesure et de leur haute surveillance lorsqu'une obligation d'étalonnage est prévue par la loi. Déjà, en 1909, on avait constaté qu'un institut équipé pour les buts précités ne pouvait pas être exploité de façon rationnelle. Pour cette raison, de même que pour maintenir une équipe entraînée de métrologues, cet institut devrait être chargé d'exécuter des travaux de métrologie pour des tiers.

Les tâches du BfPM peuvent être énumérées comme suit :

1. Activité dans le domaine de la métrologie de précision :
   — réalisation et conservation des unités et étalons ;
   — développement des méthodes de mesure et des études relatives aux instruments de mesure de précision utilisées dans le domaine scientifique de la recherche ainsi que dans l'industrie, pour la mécanique, l'électricité, l'optique, la thermodynamique et la physique atomique ;
2. Activité administrative : métrologie légale (élaboration des lois et prescriptions), cours d'instruction pour vérificateurs des poids et mesures, inspection des bureaux de vérification cantonaux et régionaux, collaboration avec d'autres institutions en vue de la coordination et de l'harmonisation des lois et prescriptions, approbation des types d'instruments de mesure ;
3. Activité en métrologie industrielle : mesures et études facultatives sur demande pour les tiers ;
4. Activité métrologique en relation avec d'autres départements ministériels de l'Administration fédérale suisse et instituts universitaires, notamment dans les domaines de la mesure des radiations ionisantes, de la circulation routière et de la physiologie aéronautique.

La structure fédéraliste suisse donne aux cantons la surveillance directe des appareils de pesage, des poids et des mesures de longueur et de capacité employés dans le commerce. Quant aux compteurs électriques, les étalonnages primaires et périodiques sont effectués par