

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Conductivité hydraulique des tapis sol-bentonite

Hydraulic conductivity of soil-bentonite blankets

R.P.CHAPUIS, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

D.BEAUDRY, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ: On étudie la conductivité hydraulique de mélanges sol-bentonite utilisés comme tapis d'étanchéité dans des projets de stockage de déchets. On donne les caractéristiques générales des mélanges. On discute les problèmes spécifiques des essais de perméabilité. Les sols sont des sables. On fournit leurs granulométries et leurs courbes Proctor. La conductivité hydraulique d'un mélange ne dépend pas principalement de sa porosité, mais des teneurs en bentonite et en fins. Les résultats sont relativement dispersés pour diverses raisons, surtout liées aux différentes techniques d'essai et à la difficulté de contrôler certains paramètres, comme le délai d'hydratation, le degré de saturation, et le gonflement du mélange sous faible confinement. Du point de vue de l'étanchéité, il est avantageux d'utiliser des sables à granulométrie étalée, avec un optimum Proctor élevé, et une teneur naturelle en fins de l'ordre de 10 à 15%.

INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, de nombreux règlements ont été adoptés pour protéger les eaux souterraines des risques de contamination par divers types de déchets. Une solution est d'enfouir les déchets dans d'épais dépôts de sols fins ou autres matériaux imperméables. Une autre solution est d'enfermer ces déchets dans des barrières d'étanchéité. Dans le cas de tapis d'étanchéité, on utilise des matériaux artificiels comme les géomembranes, ou des sols naturels comme les argiles et mélanges silteux compactés, les résidus miniers (Jessberger et Beine 1981) et les mélanges sol-bentonite (Lundgren 1981; Chapuis 1981; Abeele 1986). Dans le cas de barrières verticales, on utilise soit des tranchées de boue (mélanges sol naturel-bentonite dans une excavation réalisée à la boue), soit des parois moulées en béton de ciment ou en coulis bentonite-ciment.

Cet article traite uniquement de la conductivité hydraulique des mélanges sol-bentonite utilisés comme tapis d'étanchéité pour des enceintes ou des bassins de stockage de résidus industriels ou municipaux. Cette technique a été fréquemment utilisée au Québec et au Canada ces dernières années, et on prévoit qu'elle le sera encore plus dans le futur.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

La section type du tapis sol-bentonite (Fig.1) comprend une couche filtre (B) (si requise) sur le sol naturel décapé (A), épierré et nivelé, le mélange d'étanchéité sol-bentonite (C), une couche filtre supérieure (D) et éventuellement, une couche de protection contre les vagues, ou de circulation (E), pour certains bassins qui sont vidangés et nettoyés périodiquement.

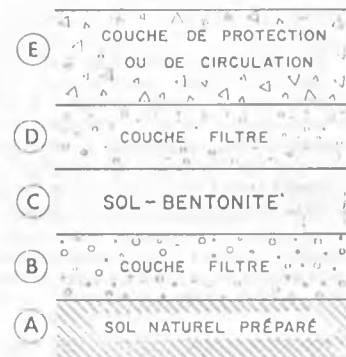


FIGURE 1: Coupe type d'un tapis d'étanchéité par mélange sol-bentonite.

En règle générale, le sol des tapis sol-bentonite est un sable. La bentonite est de variété poudreuse très fine. L'épaisseur courante du mélange est de 15 à 30 cm, pour des différences de charge hydraulique n'excédant pas 5 m. La teneur en bentonite ne dépasse pas 20%, et elle est souvent de l'ordre de 5 à 15%. Le mélange est fait sur place par diverses techniques: rotoculteur (de nombreuses passes sont nécessaires), pulvi-mélangeur et à l'occasion bétonnière. Cette dernière technique est la seule utilisable pour les projets d'étanchéisation des sols autour des réservoirs de produits chimiques, avec des accès difficiles, gênés par des tuyauteries autour desquelles un mélange généralement enrichi en bentonite est mis en place à la main. D'après l'expérience, la technique de la bétonnière donnerait le mélange le plus homogène. Mais elle serait aussi la plus délicate parce que la teneur en eau doit être ajustée précisément pour éviter que le mélange fige dans la bétonnière.

Pendant la phase de conception du mélange sol-bentonite, on doit sélectionner le sol et la bentonite, en fonction du type de résidus à contrôler (Alther 1987), et des interactions physico-chimiques possibles entre ces résidus et le complexe sol naturel - sols filtres - sol du mélange - bentonite - sol ou pierre de protection ou de roulement. Un des problèmes physico-chimiques bien documentés est l'échange ionique Na-Ca qui affecte la bentonite, lui fait perdre son pouvoir gonflant et sa performance d'étanchéité. Divers types d'essais à long terme peuvent être réalisés (Lundgren 1981; Chapuis 1981; Gordon et Forrest 1981; Alther et al. 1985; Alther 1987). Cependant, il ne faut pas oublier que c'est la stabilité de l'ensemble complet qu'il faut tester, et non pas celle du mélange sol-bentonite uniquement. Ce mélange, parfaitement stable au laboratoire, peut ne pas l'être sur le terrain, simplement parce que la couche filtre ou la couche de protection (D et E de la Fig.1) sera de pierre concassée calcaire.

ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Après la sélection préalable des matériaux, on doit procéder en laboratoire à des essais de perméabilité. Leur but est de déterminer, pour le sol et la bentonite présélectionnés, quelle teneur en bentonite permet d'atteindre une certaine imperméabilité. L'objectif est évidemment de minimiser le coût du mélange qui doit être étendu sur de grandes surfaces. Le critère d'imperméabilité est fréquemment $k < 10^{-7}$ ou 10^{-8} cm/s. Par la suite, selon le type de projet et l'expérience acquise avec des sols et des bentonites semblables, on procèdera ou non à des essais de longue durée sur le mélange final pour vérifier sa stabilité physico-chimique. Ce programme d'essais de perméabilité est relativement long, à cause des délais requis pour obtenir une hydratation complète de la bentonite.

Les essais sont effectués dans des perméamètres dits à paroi rigide ou à paroi souple qui ont divers avantages et inconvénients (Olson et Daniel 1981; Zimmie et al. 1981; Daniel et al. 1985). Les auteurs s'accordent pour dire que la cellule triaxiale est préférable car elle permet de contrôler les contraintes effectives et le degré de saturation par contre-pression (Black et Lee 1973). Cependant, l'appareil à paroi rigide donne des résultats comparables à ceux d'une cellule triaxiale (Chapuis 1981; Edil et Erickson 1985), si les fuites latérales sont bien contrôlées (par exemple en beurrant la paroi de bentonite), et si l'on respecte un long délai pour l'hydratation de la bentonite et la saturation du mélange. Il est recommandé de tester le mélange avec ses deux couches filtres, et d'utiliser un mélange de faible épaisseur (3 à 5 cm, facilement contrôlable au laboratoire), et pas plus confiné que sur le terrain, afin de lui permettre éventuellement de gonfler. Dans ces conditions, le délai requis pour obtenir un régime permanent d'écoulement, lorsque $k = 10^{-8}$ à 10^{-7} cm/s, est de 2 à 6 jours en cellule triaxiale et de 12 jours en perméamètre pour la petite épaisseur citée.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats de divers projets impliquant des tapis de sol-bentonite sont présentés. Les essais ont été réalisés par différents laboratoires et selon les deux techniques d'essai. Dans ce texte, on appelle teneur en bentonite le rapport B/S de la masse de bentonite sèche (B) ajoutée à la masse de sol sec (S).

Sols utilisés

Les sols (granulométries Fig.2) sont essentiellement des sables uniformes contenant de 2 à 15% de fins sans plasticité. Deux sols font exception. L'un d'eux est un silt et sable. Un autre contient du gravier (près de 15%) et son optimum Proctor modifié (Fig.3) est situé nettement au-dessus de ceux des sables.

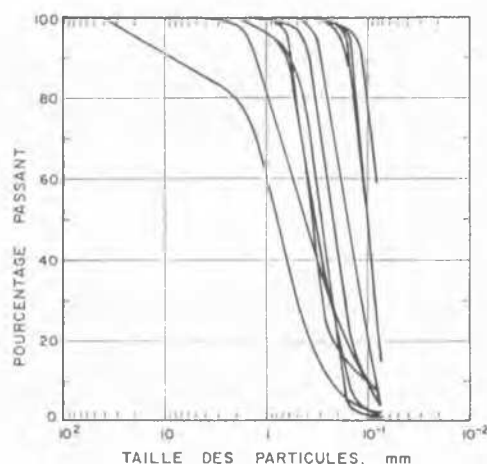


FIGURE 2: Granulométries des sols.

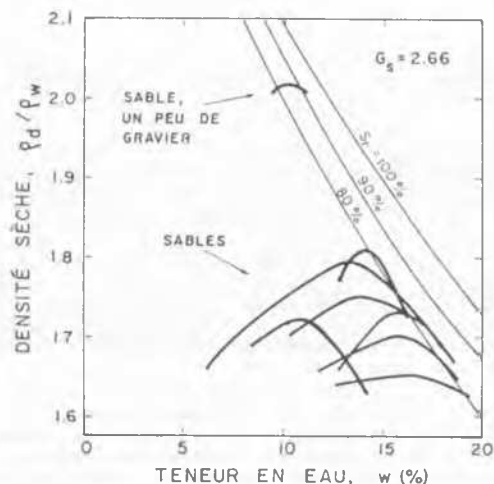


FIGURE 3: Courbes Proctor des sols.

Relation $k - n$

De nombreux modèles de prédiction relient la conductivité hydraulique à l'indice des vides ou à la porosité. Les résultats des essais (Fig.4) ne mettent en évidence aucune corrélation possible pour les mélanges sol-bentonite. On remarque que les valeurs $n < 0.35$ correspondent à des mélanges densifiés dont l'expansion était empêchée durant l'essai, ou qui avaient un rapport $B/S < 10\%$, alors que les points du quart supérieur gauche de la Fig.4 correspondent à des mélanges peu compactés, ou dont l'expansion verticale était permise, et qui avaient un rapport $B/S > 10\%$.

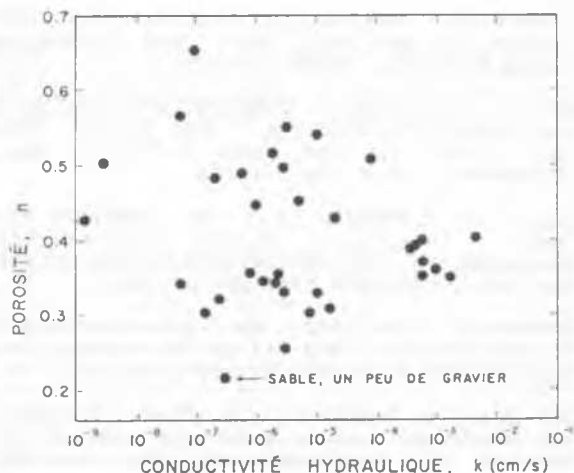


FIGURE 4: Relation k vs porosité.

Mélanges humides pour tranchées de boue

Les Figs 5 et 6 donnent des relations k versus B/S et k versus la teneur en fins, pour des mélanges humides sol-bentonite utilisés dans

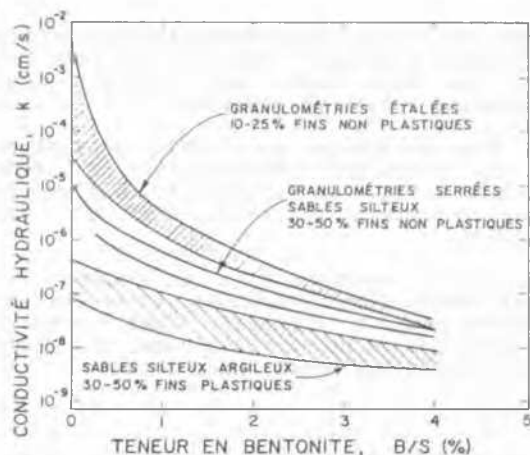


FIGURE 5: Relation k vs teneur en bentonite dans les tranchées de boue (d'après D'Appolonia, 1980).

des tranchées de boue. Cette technique utilise une faible quantité de bentonite, ajoutée à des sols naturels contenant une fraction importante de fins. De fait, l'imperméabilité de tels sols semble due surtout à la partie fine naturelle, à sa plasticité, et ensuite au procédé de construction qui homogénéise le matériau avec une boue bentonitique.

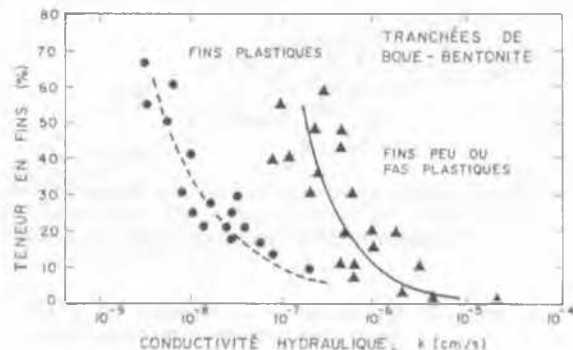


FIGURE 6: Relation k vs teneur en fins dans les tranchées de boue (d'après D'Appolonia, 1980).

Mélanges pour tapis sol-bentonite

Les Figs 7 et 8 donnent des relations $k - B/S$ et $k -$ teneur en fins, pour des tapis en sol-bentonite. Les résultats des Figs. 5 et 6 sont reportés sur les Figs 7 et 8 pour souligner les différences entre les deux techniques. Les tapis sol-bentonite utilisent des sols naturels contenant peu de fins, auxquels on doit ajouter plus de bentonite pour obtenir l'imperméabilité requise. Par exemple, pour obtenir $k < 10^{-7}$ cm/s, il faut une teneur en bentonite B/S de 5 à 13%, alors que pour obtenir $k < 10^{-8}$ cm/s, il faut une teneur B/S de 9 à 20%. Les résultats sont relativement dispersés, car les graphiques ne tiennent pas compte de divers facteurs:

- granulométries différentes (les résultats du silt et sable sont situés en bas de la Fig.7 et en haut de la Fig.8);

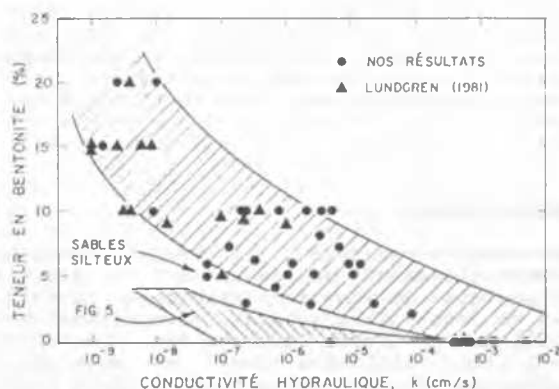


FIGURE 7: Relation k vs teneur en bentonite pour les tapis d'étanchéité.

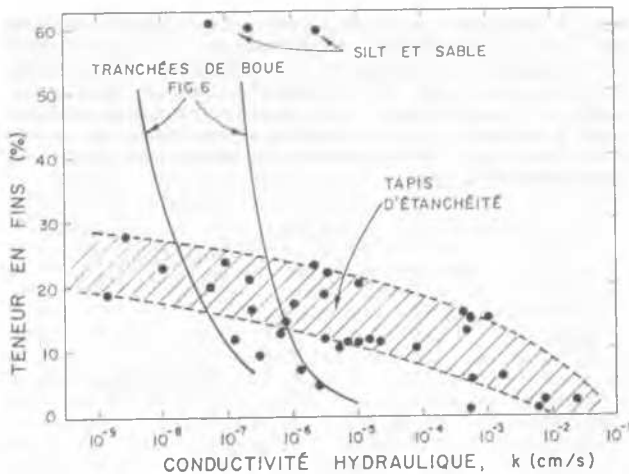


FIGURE 8: Relation k vs teneur en fins pour les tapis d'étanchéité.

- porosités différentes;
- appareils d'essais différents;
- mélanges libres ou non de gonfler;
- mélanges pour lesquels l'hydratation de la bentonite n'est pas complétée;
- valeur k pas mesurée en régime permanent, la plupart des perméamètres ne permettant pas de vérifier que les débits d'entrée et de sortie sont égaux;
- mélanges non saturés dans les perméamètres et saturés par contre-pression dans les cellules triaxiales.

CONCLUSION

L'article présente les valeurs des conductivités hydrauliques de plusieurs mélanges sol-bentonite utilisés comme tapis d'étanchéité. Les résultats diffèrent de ceux des mélanges humides utilisés pour les tranchées de boue (D'Appolonia 1980). Ils paraissent dispersés pour diverses raisons, surtout liées aux différentes techniques et à la difficulté de contrôler certains paramètres. Du point de vue de l'étanchéité, on a constaté qu'il est avantageux d'utiliser des sables à granulométrie étalée, avec un optimum Proctor élevé, et une teneur naturelle en fins de l'ordre de 10 à 15%.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société québécoise d'assainissement des eaux qui a mis à leur disposition de nombreux résultats relatifs à des projets d'étangs aérés. Les essais ont été réalisés par divers laboratoires. Les diverses bentonites utilisées dans les mélanges sont celles de Avonlea Minerals et American Colloid.

REFERENCES

- ABEELE, W.V. 1986. The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. *Nuclear and Chemical Waste Management*, 6:81-88.
- ALTHER, G.R. 1987. The qualifications of bentonite as a soil sealant. *Engineering Geology*, 23(3-4):177-191.
- ALTHER, G.R., EVANS, J.C., FANG, H.-Y. et WITMER, K. 1985. Influence of inorganic permeants upon the permeability of bentonite. In *Hydraulic barriers in soil and rock*, ASTM STP 874, pp.64-73.
- BLACK, D.K. et LEE, K.L. 1973. Saturating laboratory samples by backpressure. *ASCE Journal of the Soil Mech. and Foundation Engng Division*, 99(SM1):75-93.
- CHAPUIS, R.P. 1981. Permeability testing of soil-bentonite mixtures. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Stockholm, Vol.4, pp.744-745.
- DANIEL, D.E., ANDERSON, D.C. et BOYNTON, S.S. 1985. Fixed-wall versus flexible-wall permeameters. In *Hydraulic barriers in soil and rock*, ASTM STP 874, pp.107-126.
- D'APPOLONIA, D.J. 1980. Soil-bentonite slurry trench cutoffs. *ASCE Jnl of the Geotechnical Engineering Division*, 106(GT4):399-417.
- EDIL, T.B. et ERICKSON, A.E. 1985. Procedure and equipment factors affecting permeability testing of a bentonite-sand liner material. In *Hydraulic barriers in soil and rock*, ASTM STP 874, pp.155-170.
- GORDON, B.B. et FORREST, M. 1981. Permeability of soils using contaminated permeant. In *Permeability and groundwater contaminant transport*, STP 746, pp.101-120.
- JESSBERGER, H.L. et BEINE, R.A. 1981. Impermeabilisation of disposal sites by impervious blankets consisting of mine refuse. *Proc. of the Xth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Stockholm, Vol.4, pp.745-746.
- LUNDGREN, T.A. 1981. Some bentonite sealants in soil mixed blankets. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Stockholm, Vol.2, pp.349-3544.
- OLSON, R.E. et DANIEL, D.E. 1981. Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. In *Permeability and groundwater contaminant transport*, ASTM STP 746, pp.18-64.
- ZIMMIE, T.F., DOYNOW, J.S. et WARDELL, J.T. 1981. Permeability testing of soils for hazardous waste disposal sites. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Stockholm, Vol.2, pp.403-406.