

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.

Etude de la circulation de l'eau dans un sol perméable par analogie électrique à trois dimensions

Study of Water Circulation in a Permeable Soil by Means of Three Dimensional Electrical Analogy

par P. НАВИВ, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Docteur ès-Sciences, chef de la Section Recherches de Mécanique du Sol aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics, 12, rue Brancion, Paris, France, et F. SABARLY, ingénieur civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ingénieur au Bureau d'Etudes de la Société de Sondages, Injections, Forages, Entreprise P. Bachy, 11, avenue du Colonel-Bonnet, Paris XVI^e, France

Sommaire

La méthode des analogies électriques dans l'espace a été appliquée à l'étude de l'écoulement laminaire entre un cours d'eau et deux fouilles situées sur la même rive. Le mode de détermination des champs et des débits est décrit, ainsi que les montages particuliers. Trois catégories de problèmes ont été abordées: d'une part, l'étude des débits, pour chaque fouille ou en tenant compte de l'influence mutuelle, soit en fonction des dimensions des ouvrages, soit en fonction de leur protection par un rideau imperméable; d'autre part, l'étude de la sous-pression sous un dispositif d'étanchéité protégeant une fouille; enfin, l'étude de l'influence sur la sous-pression du choix des hypothèses, mode d'alimentation, profondeur du fond étanche, anisotropie, hétérogénéités locales, et forme de la surface libre.

La détermination du champ d'écoulement de l'eau dans un massif perméable est liée à la recherche de la fonction harmonique correspondant aux conditions aux limites du massif. L'application de la méthode des analogies électriques pour cette étude a fait l'objet de nombreux travaux et est suffisamment connue pour qu'il soit inutile d'en rappeler le principe (Raud, 1949) et les diverses techniques qui ont été utilisées (Malavard, 1950).

Il nous a paru utile de signaler cependant l'application de cette méthode à des modèles à trois dimensions que l'on ne pouvait pas simplifier en ramenant l'étude à un problème plan.

L'étude suivante concernant l'exécution de deux fouilles a été effectuée au Laboratoire du bâtiment et des travaux publics à la demande de la Société S.I.F. et en constante collaboration avec elle, et a été menée à bien très rapidement grâce au concours de M. Tcheng, ingénieur au L.T.B.P., et MM. Klein et Guenot, assistants.

Summary

The method of electrical analogies in space has been applied to the study of laminar flow between a stream and two excavations on the same bank. The means of determining fields and flows is described, as well as the ways of assembling in each case. Three categories of problems were studied: first, the study of flows for each excavation, taking into account their influence on each other, either in relation to the dimensions of the structures, or in relation to their protection by impermeable bulkheads; secondly, the study of uplift pressure under an apparatus for providing watertightness of the excavation; thirdly, the study of the influence of the choice of assumptions, on uplift pressure means of feeding, depth of watertight bottom, anisotropy, local heterogeneity, and the shape of the free surface.

Ces fouilles écartées de 400 m environ se trouvent sensiblement à 700 m d'un cours d'eau. Elles doivent être réalisées dans des alluvions très perméables de 200 m environ d'épaisseur (coefficient de perméabilité horizontal $5,4 \cdot 10^{-3}$ m/sec et verticale $0,6 \cdot 10^{-3}$ m/sec). La fouille la plus profonde devra descendre à 23 m environ sous le niveau de la nappe. L'autre à 15 m environ. Il s'agissait d'étudier la protection contre les infiltrations dans la fouille la plus profonde à l'aide d'un caisson étanche éventuel.

Les questions posées étaient les suivantes:

- Etude des débits d'infiltration dans la fouille de 23 m avec ou sans dispositif d'étanchéité protecteur et influence sur ce débit d'un épuisement simultané dans la fouille voisine.
- Etude de la sous-pression régnant sous le fond du caisson étanche protecteur de la fouille afin de déterminer le poids du caisson.
- Etude de l'influence sur cette sous-pression du choix des

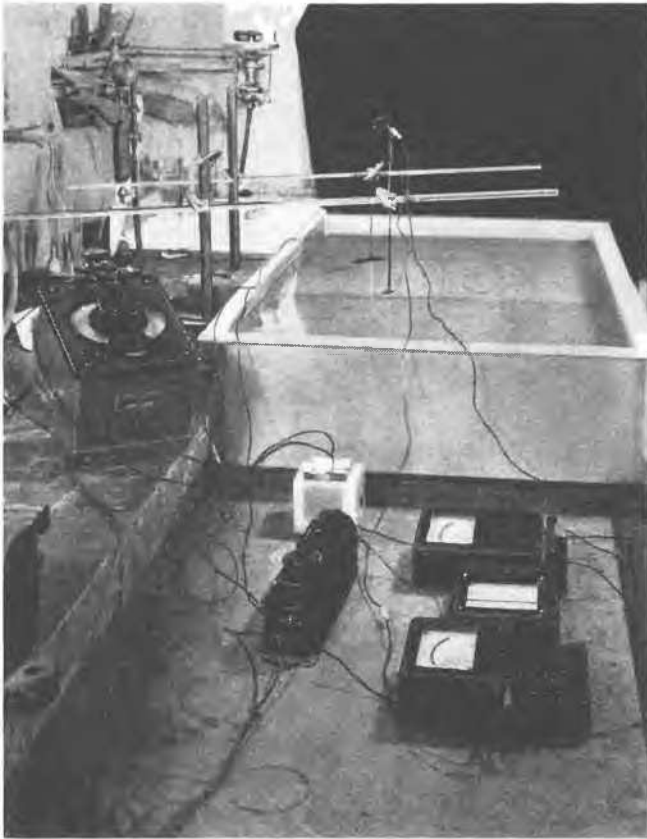


Fig. 1

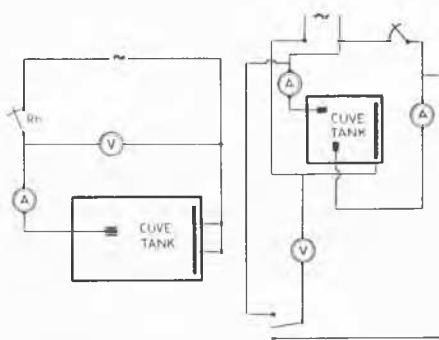


Fig. 2 A gauche: Montage dans le cas de la fouille la plus profonde seule
A droite: Montage dans le cas de l'influence des deux fouilles
On the Left: Assembly in the Case of the Deepest Excavation only
On the Right: Assembly in the Case of Influence from Both Excavations

hypothèses: mode d'alimentation de la nappe, épaisseur d'alluvions, poids du caisson, rapport des perméabilités verticales et horizontales, présence de lentilles ou très perméables ou imperméables, forme de la surface libre, etc.

Etude des débits

Le cours d'eau, supposé alimenter la nappe, et les deux fouilles sont représentés par trois électrodes en laiton placées dans une cuve non conductrice remplie d'eau. La cuve d'essai mesure $1,10 \times 0,60$ m et elle a 20 cm de profondeur. La Fig. 1 montre le montage complet.

Nous avons pris comme échelle de similitude $1 \text{ cm} = \frac{100}{3} \text{ m}$ (échelle horizontale) et en tenant compte du rapport des coefficients de perméabilité $1 \text{ cm} = \frac{100}{9} \text{ m}$ (échelle verticale).

Nous avons supposé que les deux fouilles sont uniquement alimentées par le fond de la fouille en raison de leurs grandes

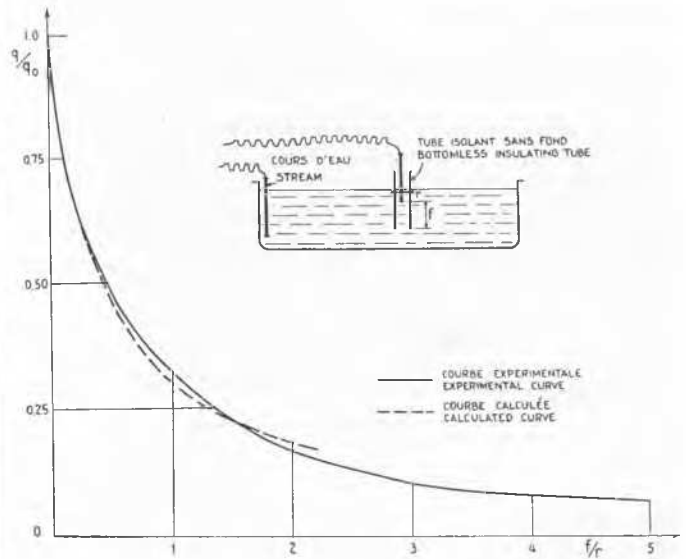


Fig. 3 Variation du débit de la fouille en fonction de la profondeur du rideau étanche – cas de la fouille profonde seule
 q_0 = débit de la fouille sans rideau d'étanchéité
 q = débit de la fouille avec rideau d'étanchéité
Flow Variation of the Excavation in Relation to the Depth of the Watertight Bulkhead—the Case of the Deepest Excavation
 q_0 = Flow of the Excavation without Watertight Bulkhead
 q = Flow of the Excavation with Watertight Bulkhead

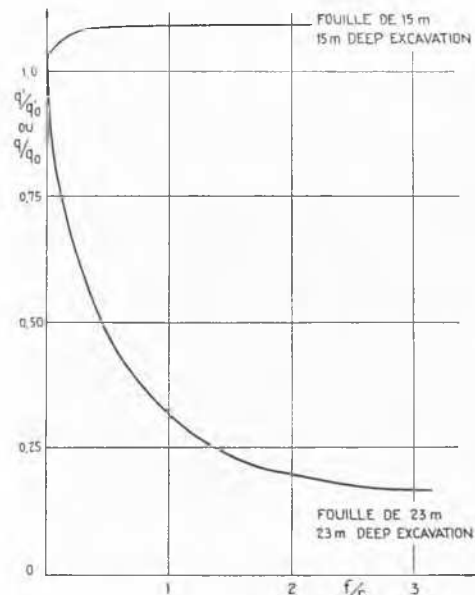


Fig. 4 Variation des débits de chacune des deux fouilles en fonction de la profondeur du rideau étanche sous la fouille de 23 m
 q_0 et q_0' sont les débits de la fouille de 23 m et de la fouille de 15 m lorsque la fouille de 23 m est dépourvue de rideau d'étanchéité
Flow Variation of Each Excavation in Relation to the Depth of the Watertight Bulkhead under the 23 m Deep Excavation
 q_0 and q_0' are the Flow of the 23 m Excavation and of the 15 m Excavation when the 23 m Excavation is not Provided with a Watertight Bulkhead

dimensions horizontales. Les différents montages ci-dessous permettent l'étude des problèmes de débit ainsi que celle de l'influence de la profondeur d'un rideau d'étanchéité vertical sur le débit (Figs. 2, 3, 4). En ce qui concerne ce dernier point les débits calculés à l'aide d'une formule dérivant de la formule de Harza (1935) coïncident remarquablement avec les débits mesurés sur le modèle.

Etude de la sous-pression sous la fouille

Une sonde ponctuelle permet de révéler le potentiel en un point quelconque du liquide conducteur (Fig. 5); en particulier, sous le fond étanche, on en déduit la valeur de la sous-pression. Avec la maquette de la Fig. 5 nous avons, par exemple, déterminé au centre du fond du caisson un potentiel de 51, le potentiel 100 étant celui du cours d'eau, le potentiel 0 celui de la

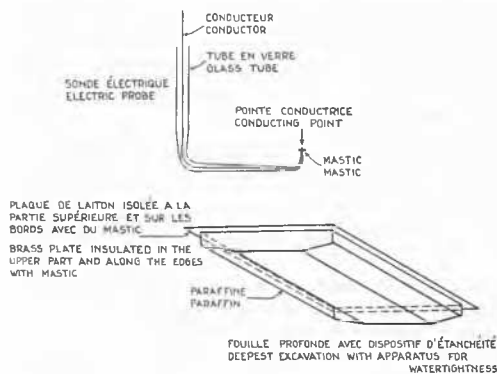


Fig. 5 Sonde électrique (en haut) et fouille profonde avec dispositif d'étanchéité (en bas)
Deepest Excavation with Apparatus for Watertightness

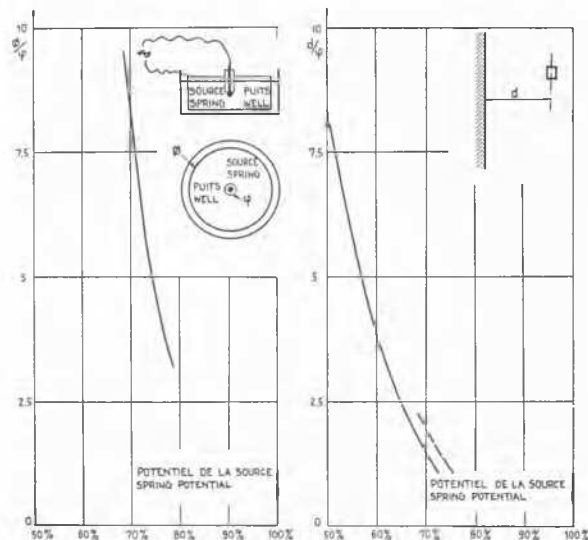


Fig. 6 à gauche: Variation de la sous-pression en fonction de \varnothing / φ
 \varnothing = diamètre de la source cylindrique
 φ = diamètre du puits rond
On the Left: Variation of the Uplift Pressure in Relation to \varnothing / φ
 \varnothing = Diameter of the Cylindrical Spring
 φ = Diameter of the Round Well

Fig. 7 à droite: Variation de la sous-pression en fonction de d / φ
 d = distance entre la source et la fouille
 φ = diamètre fictif de la source supposée circulaire
On the Right: Variation of the Uplift Pressure in Relation to d / φ
 d = Distance between the Spring and the Excavation
 φ = Supposed Diameter of the Assumed Circular Excavation

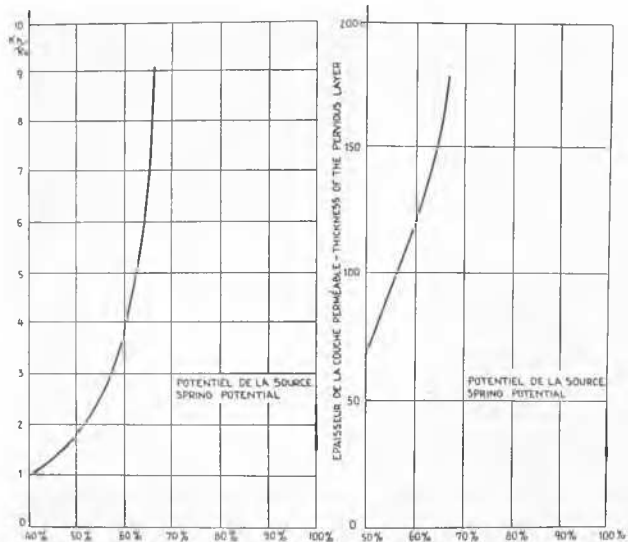


Fig. 8 à gauche: Variation de la sous-pression en fonction de K_h / K_v
 K_h = coefficient de perméabilité horizontal
 K_v = coefficient de perméabilité vertical
On the Left: Variation of the Uplift Pressure in Relation to K_h / K_v
 K_h = Horizontal Coefficient of Permeability
 K_v = Vertical Coefficient of Permeability

Fig. 9 à droite: Variation de la sous-pression en fonction de l'épaisseur de la couche perméable
On the Right: Variation of the Uplift Pressure in Relation to the Thickness of the Pervious Layer

surface drainante la plus basse. La valeur de la sous-pression maximum est donc les $\frac{51}{100}$ de la perte de charge h entre le cours d'eau et la fouille. La variation de la sous-pression en fonction de la profondeur du dispositif d'étanchéité sous la fouille est obtenue très simplement avec des maquettes de hauteurs différentes et ceci permet de calculer la profondeur du fond du caisson.

Influence du choix des hypothèses

Ces différents problèmes ont été traités en supposant la surface libre horizontale. Dans chaque série d'essais un seul paramètre a varié et nous avons cherché l'influence sur la valeur de la sous-pression au centre du dispositif d'étanchéité.

ALIMENTATION DE LA NAPPE

1° Variation de la sous-pression (sous le fond étanche) en fonction du diamètre de la source supposée être un cylindre de révolution concentrique à la fouille. Les résultats sont indiqués sur la Fig. 6. Nous avons porté:

- en ordonnées le rapport de \varnothing / φ (\varnothing étant le diamètre de la source circulaire, φ le diamètre fictif du puits rond de même surface que le modèle utilisé);
- en abscisses le potentiel mesuré sous le dispositif d'étanchéité; ce potentiel varie peu en fonction de \varnothing / φ .

2° Variation de la sous-pression en fonction de la distance de la fouille à une source rectiligne indéfinie. Les résultats sont indiqués sur la Fig. 7. En ordonnées, nous avons porté le rapport d / φ où d est la distance variable. A titre de vérification, nous avons tracé en pointillé sur la Fig. 7 les résultats de la Fig. 6 en considérant $\varnothing = 4d$ comme l'indique la théorie. Les deux courbes sont pratiquement superposables, leur écart pouvant provenir de ce que la source rectiligne n'est pas réellement infinie dans nos essais. D'une façon générale, la sous-pression diminue à mesure que la distance augmente.

ETUDE DU MILIEU PERMEABLE

1° *Variation de la sous-pression en fonction du degré d'anisotropie du milieu perméable.* Cette étude a été effectuée en faisant subir au modèle une affinité verticale de module variable égale à K_h/K_v .

La Fig. 8 indique la variation du potentiel sous le caisson, en fonction du rapport: K_h/K_v .

La sous-pression ne varie pas d'une manière sensible lorsque K_h/K_v est supérieur à 5. L'effet d'une anisotropie même faible ($K_h/K_v \leq 5$) est d'augmenter assez considérablement la sous-pression.

2° *Variation de la sous-pression en fonction de l'épaisseur de la couche perméable.* La Fig. 9 indique cette variation en fonction de la profondeur de la couche perméable. La variation est relativement peu importante tant que la partie inférieure de la couche est située assez loin du dispositif d'étanchéité.

3° *Hétérogénéité locale.* Influence de la présence des lentilles perméables et imperméables par rapport au terrain général.

Lentilles imperméables: Nous avons immergé dans la cuve une plaque isolante de $9 \text{ cm} \times 12$ équivalente à une lentille imperméable de $300 \times 400 \text{ m}$. La présence d'un écran imperméable tend à faire diminuer la sous-pression. D'une façon générale, tant que cette couche imperméable se trouve à une distance du fond étanche supérieure à 25 m , la diminution de la sous-pression est très faible, sauf dans le cas où la couche imperméable masque complètement le fond étanche.

Couche très perméable: Nous avons immergé dans la cuve une plaque conductrice représentant une lentille perméable de $300 \times 400 \text{ m}$. Sa présence n'augmente pratiquement pas la valeur de la sous-pression sous le fond étanche.

4° *Influence de la forme de la surface libre.* Pour déterminer une forme approximative de la surface libre, nous avons utilisé la méthode de la cuve inclinée dont nous rappellerons brièvement le principe. Une cuve à fond incliné, remplie de liquide conducteur, forme un dièdre liquide représentant une partie d'un espace de révolution dont l'axe serait l'arête du dièdre. La détermination des équipotentielles et des lignes de courant à la surface du liquide de la cuve donne une méridienne du champ qui est alors complètement déterminé. Ceci permet de rechercher les débits, les sous-pressions, etc.

L'utilisation de cette méthode nous a donc obligés à substituer à la fouille une maquette admettant un axe de révolution. Le nouveau modèle avait les mêmes cotes verticales que le modèle réel; la surface de base du caisson étanche, ainsi que celle de la couronne drainante étaient équivalentes dans les deux



Fig. 10

modèles (Fig. 10). Indiquons, enfin, que cette méthode permet l'étude d'hétérogénéités locales admettant l'axe de révolution du modèle.

Nous avons donné à la surface libre les formes indiquées par les deux schémas de la Fig. 11. Le schéma I correspond au modèle de révolution substitué au modèle réel avec nappe

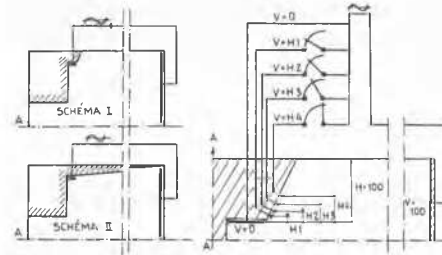


Fig. 11 à gauche: Influence de la forme de la surface libre
On the Left: Influence of the Shape of the Free Surface

Fig. 12 à droite: Schéma du montage pour la recherche de la surface libre
On the Right: Assembly of Apparatus for the Study of the Free Surface

libre horizontale. Le schéma 2 au même modèle, la surface libre étant un cône de révolution. La surface libre réelle est obligatoirement comprise entre celle de ces deux schémas. Nous avons constaté que le potentiel en A centre de la surface de base du caisson ne varie pratiquement pas à la précision

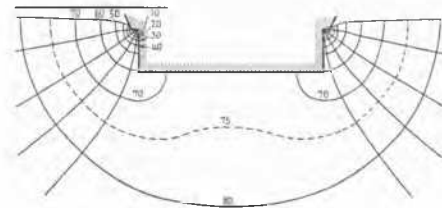


Fig. 13 Réseau d'infiltration
Seepage Network

près de nos appareils de mesure. Sur la paroi latérale de la fouille, dont la pente est augmentée de trois fois par la distortion, nous avons placé des électrodes élémentaires dont le potentiel électrique dépend de la cote par rapport au niveau du cours d'eau (Fig. 12). La présence de ces électrodes n'a pas fait varier sensiblement, le potentiel en A . La sous-pression en A n'est influencée sensiblement, ni par la forme de la surface libre, ni par la position du point d'émergence. En utilisant deux électrodes élémentaires de 1 mm d'épaisseur et distantes de $0,5 \text{ mm}$ nous avons déterminé, par approximations successives, une surface voisine de la surface libre (Fig. 13).

Conclusions

L'étude des différentes hypothèses que nous venons d'envisager: alimentation, milieu perméable, forme de la surface libre, montre que la sous-pression, sous le modèle que nous avons étudié, garde une valeur presque constante lorsque les différents paramètres varient sensiblement autour des caractéristiques prévues. Une variation de 5% sur la valeur de la sous-pression maximum semble englober largement les incertitudes raisonnables que l'on peut envisager pour les hypothèses.

La sous-pression ainsi déterminée prend alors le caractère

d'un coefficient physique significatif. Les résultats obtenus sur modèle réduit sont en toute vraisemblance directement utilisables pour le modèle définitif à l'encontre des mesures de débit qui, elles, ne peuvent être utilisées qu'en fonction des coefficients de perméabilité mesurés sur le terrain, par exemple par des essais de pompage.

Tout ceci souligne l'intérêt de la méthode des analogies électriques à trois dimensions qui est susceptible de donner rapidement des résultats précis et nombreux pour certains problèmes d'hydraulique laminaire.

Références

- Harza, L. F.* (1935): Uplift and Seepage under Dams on Sand. Trans. Am. Soc. C.E., 100, 1352-1385.
- Malavard, L.* (1950): La technique des analogies électriques. Technique de Physique, édition CNRS, juin, vol. II, chap. 15.
- Perez, J. et Malavard, L.* (1938): La méthode d'analogies rhéographiques et rhéométriques. Bull. de Soc. Fr. des Electriciens, août.
- Raud, J.* (1949): Quelques méthodes d'études sur modèles réduits en résistance des matériaux. Annales de l'I.T.B.T.P., N° 67, mars/avril, p. 47-48 (analogie dans le plan).