

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.

La Mesure *in situ* de la Porosité des Sables

Measurement *in situ* of the Porosity of Sand

par H. CAMBEFORT, Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées, Professeur à l'École des Travaux Publics, Soletanche, 7 rue de Logelbach, Paris, France

Sommaire

Les échantillons intacts de sable peuvent être perturbés pendant leur transport ou au moment de leur prélèvement. Les caractéristiques du sol mesurées au laboratoire peuvent alors être beaucoup trop favorables.

La porosité du sol est liée à sa résistivité électrique, par une formule expérimentale indiquée.

La résistivité peut être obtenue par un carottage électrique. Pour ce carottage on a choisi le courant alternatif afin d'augmenter la précision.

A l'heure actuelle tout sondeur digne de ce nom est capable de prélever correctement des échantillons intacts de sables. Suivant les cas il utilise le carottier BISHOP (1948) ou un carottier ordinaire à minces parois. Mais avec ce dernier appareil il est nécessaire de remplir le forage avec de la boue, sinon le carottier remonte toujours vide.

On pourrait ainsi penser que l'étude des fondations sur sables peut se faire très facilement à partir des caractéristiques du sable mesurées au laboratoire sur des échantillons intacts.

L'expérience de plusieurs chantiers de reconnaissance nous a montré qu'il n'en était pas toujours ainsi et que l'on pouvait faire de très grosses erreurs en appliquant brutalement cette méthode.

Cette erreur nous est apparue lors de l'étude d'un remblai de cendres volantes de centrale thermique constituant un dépôt extrêmement lâche (indice des vides $e = 3$ environ). Les premiers échantillons transportés par camionnette au laboratoire situé à une vingtaine de kilomètres du chantier montraient tous une sédimentation très nette à l'arrivée.

D'autres échantillons disposés sur un matelas de chiffons placé sur le siège arrière d'une voiture de tourisme, et transportés avec le plus grand souci d'éviter les secousses, ont eux-aussi, été perturbés par le transport. Le problème n'a été résolu que par l'installation d'un laboratoire de fortune sur le chantier. Une carotte Kjellman a été prélevée sur toute l'épaisseur du dépôt (environ 6 m), et on a pu remarquer qu'un quart d'heure après le dégarnissage de la carotte il y avait déjà une quantité non négligeable de l'eau interstitielle qui s'était écoulée, entraînant ainsi sans aucune vibration un resserrement du squelette.

Ainsi les échantillons intacts sur le chantier ne l'étaient plus au laboratoire malgré toutes les précautions prises en cours de transport.

D'autres fois, et c'est sans doute le cas le plus courant, les échantillons arrivent en parfait état au laboratoire. Mais on constate alors que les caractéristiques de ces échantillons sont remarquables, alors que l'on sait par expérience que les fondations sur ce sol ne sont pas toujours stables.

Il nous est ainsi arrivé d'avoir des échantillons de sable dont le frottement interne déduit d'essais triaxiaux réalisés par MECASOL était toujours supérieur à 45 degrés, certains échantillons ayant même 51 degrés, alors que le poinçonnement de plusieurs pieux battus et d'un gros pieu foré correspondaient

Summary

Undisturbed sand samples may be disturbed while being taken, or during transport. As a result, the characteristics of the ground, as given by laboratory tests, may be optimistic.

The porosity of the ground is related to its electrical resistivity by the experimental formula indicated. The resistivity can be found by electrical logging methods. In order to increase the accuracy of electrical logging, alternating current was chosen.

incontestablement à un angle de frottement interne de l'ordre de 25 degrés.

Le carottier utilisé satisfaisait aux conditions de HVORSLEV (1949): épaisseur des parois du sabot 2.5 mm pour un diamètre de carotte de 80 mm. On ne pouvait donc pas l'incriminer. Par contre il avait été enfoncé par battage, et il avait pu en résulter des vibrations qui avaient tassé le sol. Mais même s'il avait été enfoncé par pression, il ne faut pas oublier que le forage des formations sableuses se fait en général par battage d'une colonne de revêtement provisoire ou par battage au trépan, et que le choc de ceux-ci peut être suffisant pour resserrer le terrain au fond et tout autour du forage.

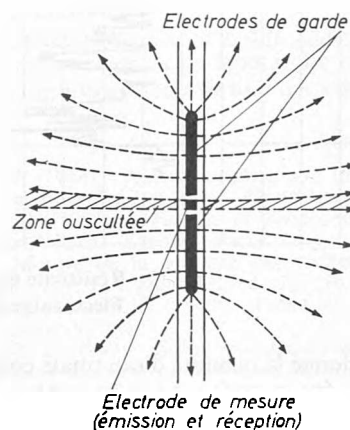


Fig. 1 Sonde à électrodes de garde pour carottage électrique
Testing device with guard electrodes for electrical logging

L'échantillonnage des sols granuleux lâches ne peut donc se faire qu'avec un carottier convenable enfoncé par pression, au fond d'un forage réalisé par lançage ou par rotation. Mais ces méthodes ne sont pas toujours possibles, soit qu'une couche intermédiaire dure interdise le lançage, soit que la dimension des grains du sol, gros sable ou petit gravier, empêche l'enfoncement du carottier par pression. Nous avons ainsi été amenés à mettre au point un procédé simple permettant la mesure directe de la porosité des formations sablo-graveleuses.

Deux méthodes étaient possibles: le carottage radio-actif et le carottage électrique (CAMBEFORT, 1955a).

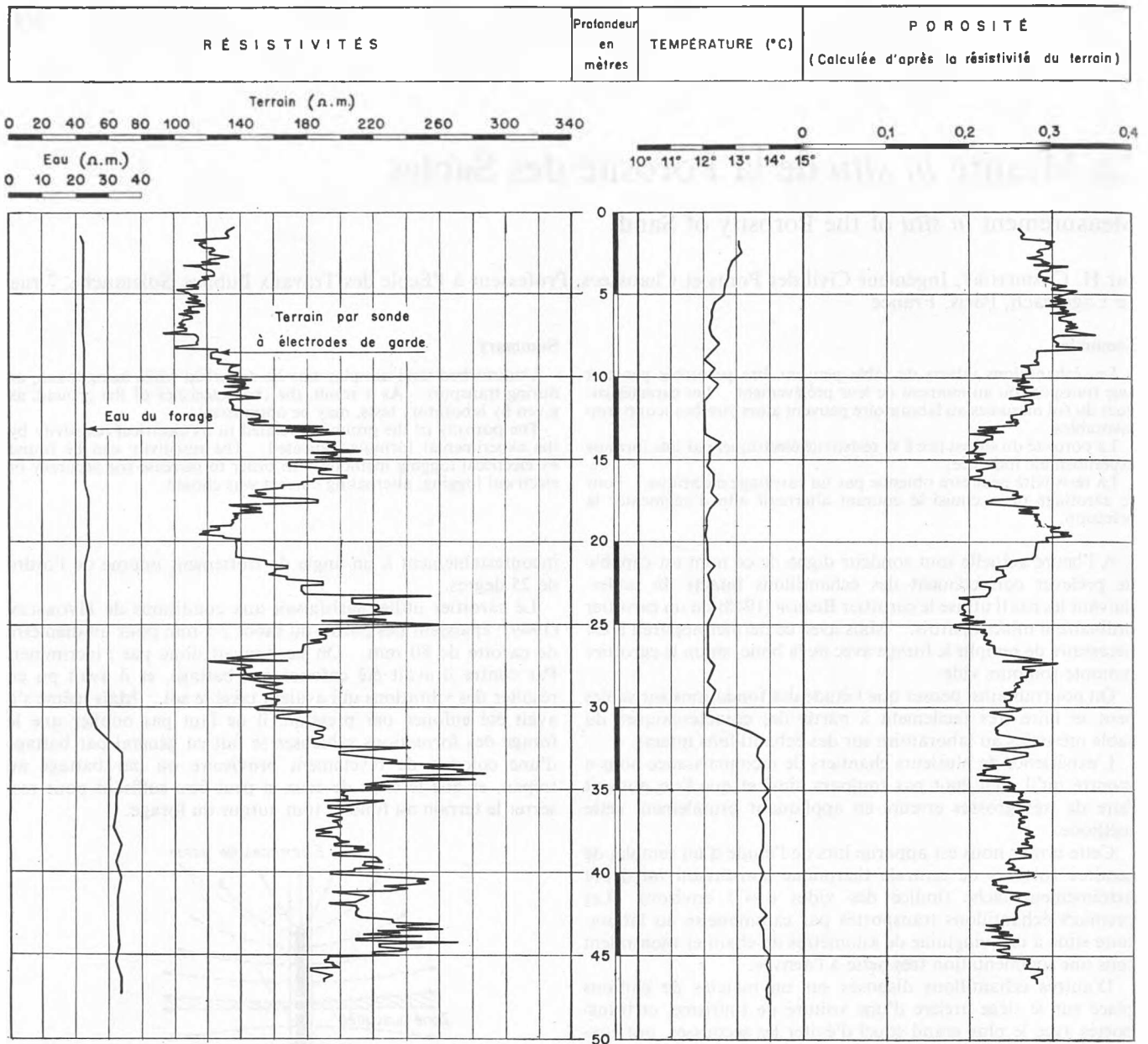


Fig. 2 Résistivité électrique et porosité d'un massif sablo-graveleux
Electrical resistivity and porosity of a gravel-sand formation

Le premier qui donne la quantité d'eau totale contenue dans le sol est théoriquement parfait pour les sables et graviers. Pour les argiles il ajoute l'eau liée à l'eau interstitielle.

Le second ne convient que si les particules du sol ne sont pas conductrices de l'électricité. Il ne convient donc pas pour les argiles, ni pour les sables argileux. Par contre en choisissant convenablement ce procédé on peut lui donner un grand rayon d'action indispensable pour rendre négligeable l'influence perturbatrice des parois du forage éventuellement compactées par la perforation. Cet avantage associé à l'ennui de manipuler des substances radio-actives nous a fait choisir le carottage électrique qui est en outre d'une mise en œuvre très rapide.

Depuis longtemps le carottage électrique est utilisé par les pétroliers pour tester leurs forages. De nombreuses études ont été faites pour essayer de relier porosité et résistivité du milieu. Mais toutes ces études partent d'un mauvais pied en faisant intervenir une variable arbitraire appelée facteur de

formation, et le résultat auquel elles aboutissent a un tout petit domaine d'application.

Une série de mesures complétant les essais de MM. Albert et Chaumet nous a permis de donner la formule suivante (CAMBEFORT, 1955b).

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{1.56}{(\rho/\rho_0 - 1)^{0.9}}$$

e = indice des vides, n = pourcentage des vides, ρ = résistivité du milieu, et ρ_0 = résistivité du liquide interstitiel.

Cette formule expérimentale est satisfaisante dans un domaine de porosité compris entre 0.0566 ($e = 0.06$) et 0.85 ($e = 5.7$). Comme on peut le remarquer l'étendue de ce domaine est beaucoup plus grande que celle des porosités des dépôts sablo-graveleux, ce qui est indispensable pour l'application de la formule.

La mesure de ρ se fait par carottage électrique. Afin

d'obtenir des diagrammes bien détaillés nous avons choisi une sonde à électrodes de garde (Fig. 1) qui impose l'emploi du courant alternatif.

La partie centrale de la sonde, de quelques millimètres de long est isolée du haut et du bas. Ces trois parties sont portées

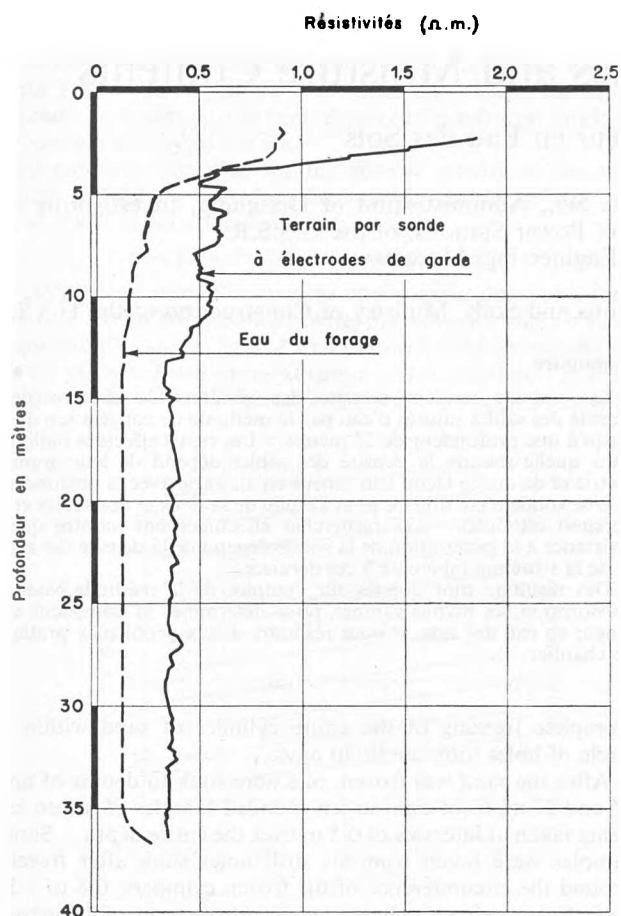


Fig. 3 Résistivité d'un massif de sables fins. Il lui correspond une porosité de 0,455 alors que celle des échantillons intacts était comprise entre 0,33 et 0,44 avec toujours une valeur minimum en haut de la carotte

Resistivity of a formation of fine sand. The corresponding porosity is 0,455, while that found from an undisturbed sample varied from 0,33 to 0,44—the minimum value always at the top of the sample

au même potentiel. Ainsi en mesurant l'intensité du courant émis par l'électrode centrale, il est possible de calculer la résistance électrique d'un disque de terrain dont le diamètre est de l'ordre du mètre et l'épaisseur celle du centre de la sonde.

Ce procédé très sensible donne des diagrammes extrêmement

fouillés (Fig. 2) ou au contraire désespérément uniformes (Fig. 3). Leur simple aspect donne donc des indications précieuses sur l'hétérogénéité du sous-sol.

Si le carottage est réalisé dans un forage perforé à la boue il faut apporter une correction due à la résistivité de la boue différente de celle du terrain. Cette correction devient très faible si le forage a été perforé à l'eau claire et tubé avec une colonne isolante perforée (brevet Soletanche).

La transformation du diagramme des résistivités en diagramme des porosités se fait par application de la formule précédente à condition de connaître la résistivité du liquide interstitiel. Celle-ci est mesurée directement dans le forage ou sur un échantillon d'eau prélevé par pompage ou encore calculée à partir de la mesure au laboratoire de la résistivité d'un échantillon de sol dont on détermine ensuite la porosité. L'application de la formule précédente permet de calculer la résistivité de l'eau interstitielle.

Si la température du sous-sol n'est pas uniforme, une correction de température est nécessaire.

Quelques essais sont en cours pour voir si la mesure des potentiels électriques spontanés du forage est suffisante pour évaluer cette résistivité avec assez de précision. Il en résulterait une grande simplification.

Enfin lorsque le diagramme des résistivités est très dentelé on peut tout simplement mesurer au laboratoire les porosités maximum et minimum du sable et évaluer la résistivité du liquide aux points extrêmes du diagramme des résistivités. C'est souvent suffisant pour la pratique.

Cette mesure *in situ* de la porosité des sables ne dispense pas du prélèvement d'échantillons intacts. Mais ceux-ci peuvent être perturbés par leur prélèvement même ou par leur transport. Il suffit de mesurer au laboratoire l'angle de frottement interne correspondant à un indice des vides e donné pour que l'application de la formule de CAQUOT et KÉRISEL (1949)

$$\tan \phi = A/e$$

permette de calculer la constante A et l'angle de frottement réel en tout point du terrain.

Ainsi les échantillons de sable dits intacts reprennent toute leur valeur, et les mesures de laboratoire ne risquent plus de conduire les Ingénieurs non avertis à des erreurs très graves.

Références

- BISHOP, A. W. (1948). A new sampling tool for use in cohesionless sands below ground water level. *Géotechnique, Lond.*, 1, 125
- CAMBEFORT, H. (1955a). *Forages et Sondages. Leur Emploi dans les Travaux Publics*. Eyrolles, Paris
- (1955b) Mesure de la porosité des roches par des méthodes électriques. *Rev. Inst. franç. Pétrole*, 10, No. 10
- CAQUOT, A. et KÉRISEL, J. (1949). *Traité de Mécanique des Sols*. Paris; Gauthier-Villars
- HVORSLEV, M. J. (1949). *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes*. U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi