

# reconnaissance géotechnique depuis une chambre submersible

H.C. VAN DE GRAAF

Laboratoire de mécanique des sols de Delft (Pays-Bas)

## 1. INTRODUCTION

La moitié des Pays-Bas se trouve en dessous du niveau de la mer. Ceci explique en partie le développement dans ce pays des méthodes d'opération sous-marines de géotechnique. Ce développement fut accéléré dans les années 70, visant le marché pétrolier en mer du nord.

L'un des résultats fut le système Mission I, qui comprend une tourelle de plongée, attachée à une plaque de base avec un pénétromètre incorporé. Ce système est la copropriété du laboratoire de mécanique des sols de Delft et de la société Vriens. Il peut être utilisé sous 200 m d'eau et permet d'effectuer:

- les essais au pénétromètre;
- le carottage Begemann, permettant d'obtenir un seul échantillon intact d'une longueur pouvant atteindre 30 mètres;
- la mesure de la densité en place des sols par méthode électrique ou nucléaire;
- les essais de perméabilité.

Le système Mission II permet également le forage rotatif non destructif.

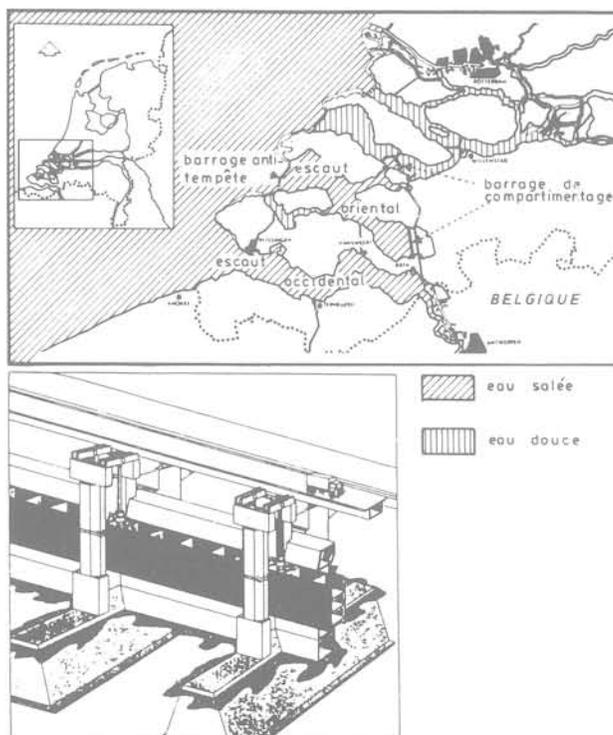


Fig. 1. — Barrage anti-tempête.  
Situation et vue en perspective.

## 2. LE PLAN DELTA

Mission I fut employée pour la première fois dans le cadre du plan Delta néerlandais. Le projet d'un barrage anti-tempête d'une longueur de 6 km dans un terrain de sable meuble exigeait une campagne de reconnaissance extrêmement intensive dans des conditions maritimes difficiles :

- jusqu'à 40 m d'eau ;
- vitesse de courant d'eau 2 m/s ;
- des vagues de 1 m à 1,5 m sont très fréquentes.

Une barge spéciale fut construite pour lancer le système Mission.

Le système Mission comprend une plaque de base lourde et une tourelle à partir de laquelle toutes sortes d'essai in situ peuvent être effectués, en sol comme en roche. A cet effet, la plaque de base est équipée d'un vérin creux pour la pénétration des sondes ; Mission II est également équipé d'une sondeuse à rotation.



Fig. 2. — Tourelle de plongée Mission.

Bien que le système ait été conçu pour résister à des pressions à 200 m de profondeur, la pression dans la tourelle n'est qu'atmosphérique pour la plupart des essais. Dans certains cas, lors d'un carottage par exemple, cette pression est la même que la pression ambiante. A cet effet, Mission comporte un système de saturation.

Le premier problème fut la détermination de la zone à compacter par vibroflotation par les moyens suivants :

- au pénétromètre statique à pointe électrique (quelques centaines) ;
- par carottage Begemann (quelques dizaines) ;
- par pénétrométrie utilisant les sondes densitométriques (quelques dizaines).

Ces deux dernières méthodes furent développées à Delft dans les années 60. La densitométrie électrique se fait au moyen de 2 sondes pénétrométriques. La première sonde permet de mesurer la résistance à la pointe, le frottement latéral, et la résistance électrique du sol. La deuxième sonde permet de mesurer la résistivité électrique de l'eau interstitielle. Au moyen d'un étalonnage au laboratoire, on détermine, pour un terrain donné le rapport entre le quotient résistivité eau/résistivité sol et la porosité.

Cette méthode, aujourd'hui couramment utilisée pour les terrains sableux, fut employée fréquemment dans la deuxième partie de l'opération avec comme objectif l'optimisation du compactage par vibroflotation.

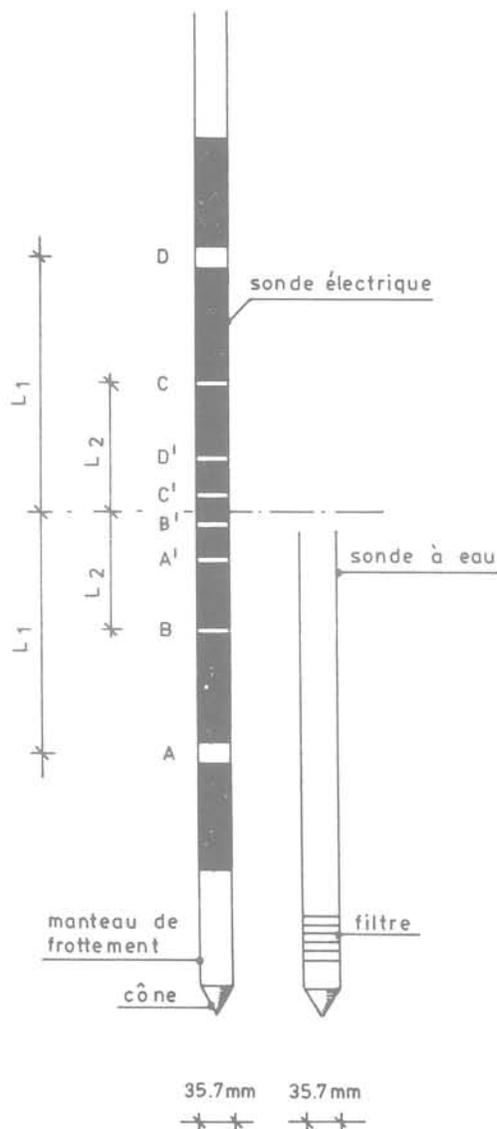


Fig. 3. — Sondes utilisées pour la mesure électrique de la densité.

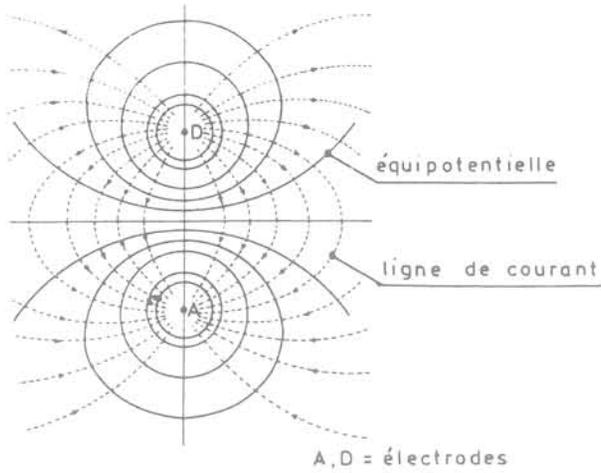


Fig. 4. — Système de lignes de courant et d'équipotentiellles engendré par une différence de potentiel entre A et D.

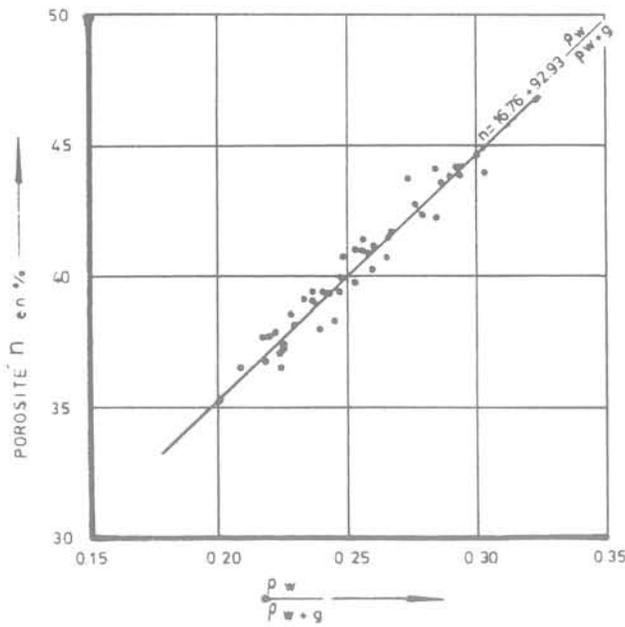


Fig. 5. — Courbe d'étalonnage.

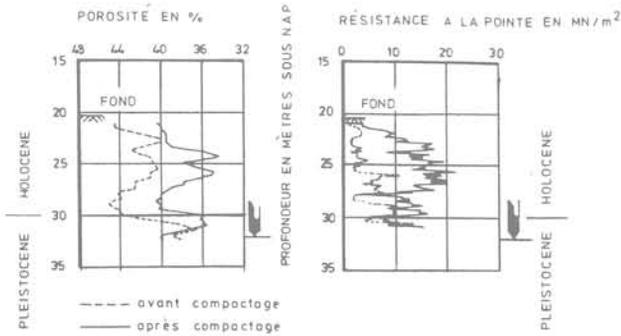


Fig. 6. — Résistance à la pointe et porosité avant et après compactage.

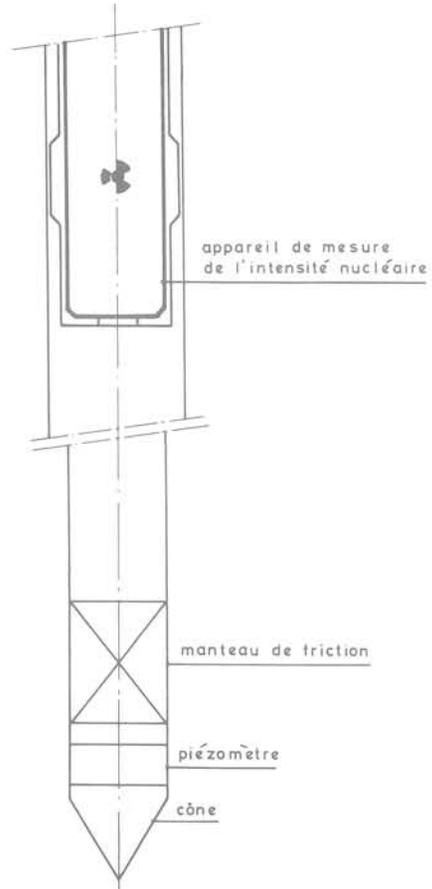


Fig. 7. — Appareil de mesure de densité nucléaire.

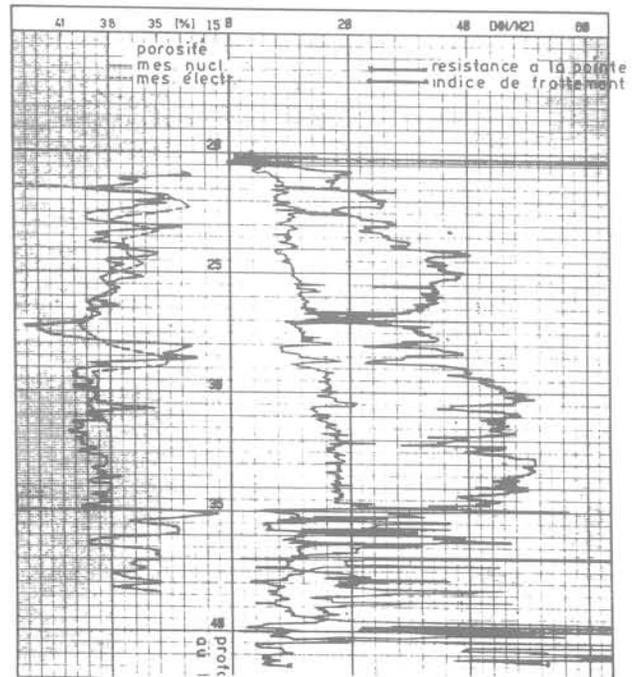


Fig. 8. A gauche : comparaison entre les résultats de mesures électriques et nucléaires. A droite : résultats de la pénétrométrie.

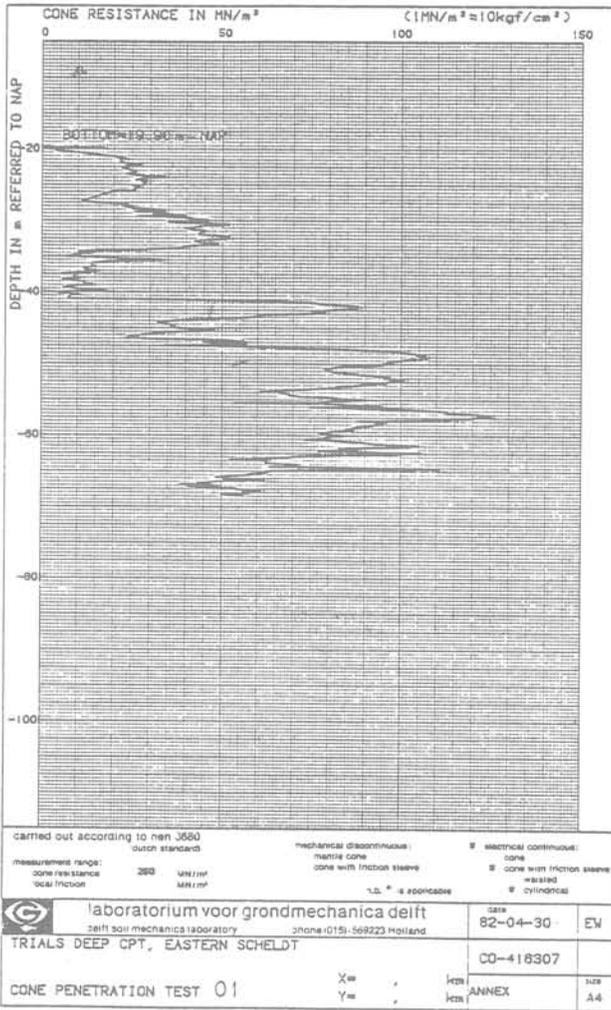


Fig. 9. — Résistance au cône en fonction de la profondeur.

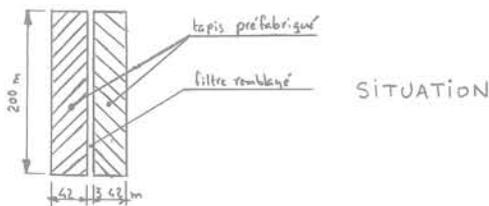


Fig. 10. — Situation.

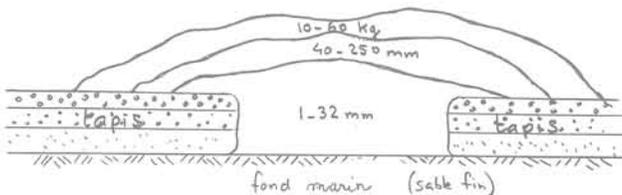


Fig. 11. — Coupe transversale du remblai.

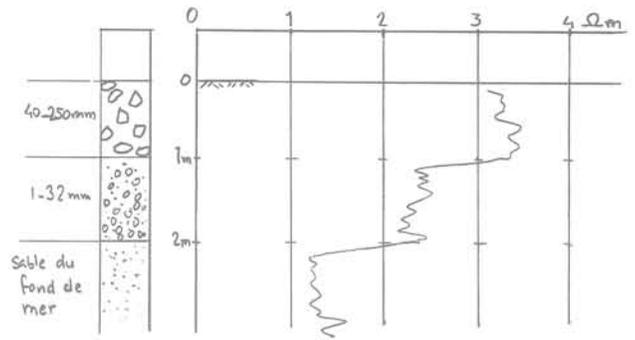


Fig. 12. — Résistivité électrique du sol.

L'inconvénient de cette méthode d'une qualité excellente par ailleurs est que l'utilisation de la «sonde à eau» demande beaucoup de temps dans un terrain moins perméable comme le sable fin ou limoneux. C'est pour cette raison qu'a été développée la densitométrie nucléaire par pénétrométrie. Cette méthode comprend un essai pénétrométrique électrique normal, à l'exception du diamètre de la pointe et des tiges, qui est de 45 mm au lieu de 36 mm. Après avoir atteint le refus on retire le câble électrique et on descend à l'intérieur des tiges jusqu'à la pointe le train de mesure nucléaire comprenant une source rayons γ de 3 millicurie et un appareil de mesure. Ensuite on remonte le train de tiges, y compris le train de mesure tout en effectuant les mesures de la densité. L'avantage c'est qu'ainsi le risque de perte de la source nucléaire durant l'effort de pénétration est évité.

Le résultat de la méthode nucléaire est comparable à celui de la méthode électrique.

Pour augmenter la profondeur de pénétration, on a réalisé une pointe d'un diamètre légèrement plus grand que celui des tiges et d'une qualité d'acier beaucoup plus résistant, ceci dans le but de diminuer le frottement latéral, et utilisé une deuxième tige qui empêche le flambage de la première et qui diminue son frottement.

L'essai suivant a été réalisé en appliquant une force de 600 kN sur une tige de 36 mm.

Actuellement, les travaux de compactage de la barge Mytilus sont terminés mais d'autres problèmes géotechniques se posent, en particulier, le problème du filtre.

Les piliers du barrage seront placés sur ce filtre, qui doit éviter que dans le cas d'un barrage fermé, l'eau qui passe sous le barrage et qui remonte ensuite vers le fond emporte les grains de sable. Le filtre devra garantir que l'eau puisse sortir du fond et non pas le sable. De plus ce filtre doit résister à l'érosion par le courant dans le cas d'un barrage ouvert.

Ce filtre est constitué par des tapis préfabriqués, composés de trois couches de sable grossier ou gravier fin. Entre deux tapis, on construit le filtre sur place par remblayage sous l'eau.

Actuellement Mission I est utilisé pour contrôler la composition de ce filtre au moyen de carottage Begemann ou par la mesure de la résistivité électrique du sol. Ce paramètre est une bonne indication pour la détermination de la composition d'une couche.

En dehors du système Mission, un autre système est utilisé pour ces essais. C'est un appareil téléguidé, nommé Geodoff, qui permet la pénétration statique légère (30 kN) ou le vibrocarottage.

Geodoff fut employé également en Mer du Nord pour la reconnaissance du tracé d'un pipe-line.

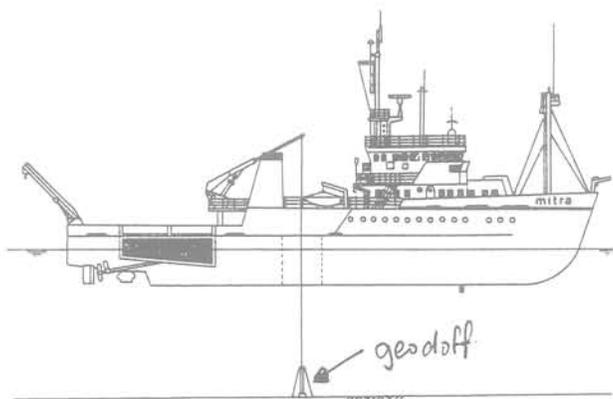


Fig. 13. — Le système Geodoff.

Comme vous voyez le système Mission I a toujours été occupé (soit opérationnel, soit paré) dans le Oosterschelde entre 1976 et 1983.

Son succès a conduit à la construction de Mission II, muni en supplément d'une foreuse à rotation, employé en 1981 à Terre-neuve.

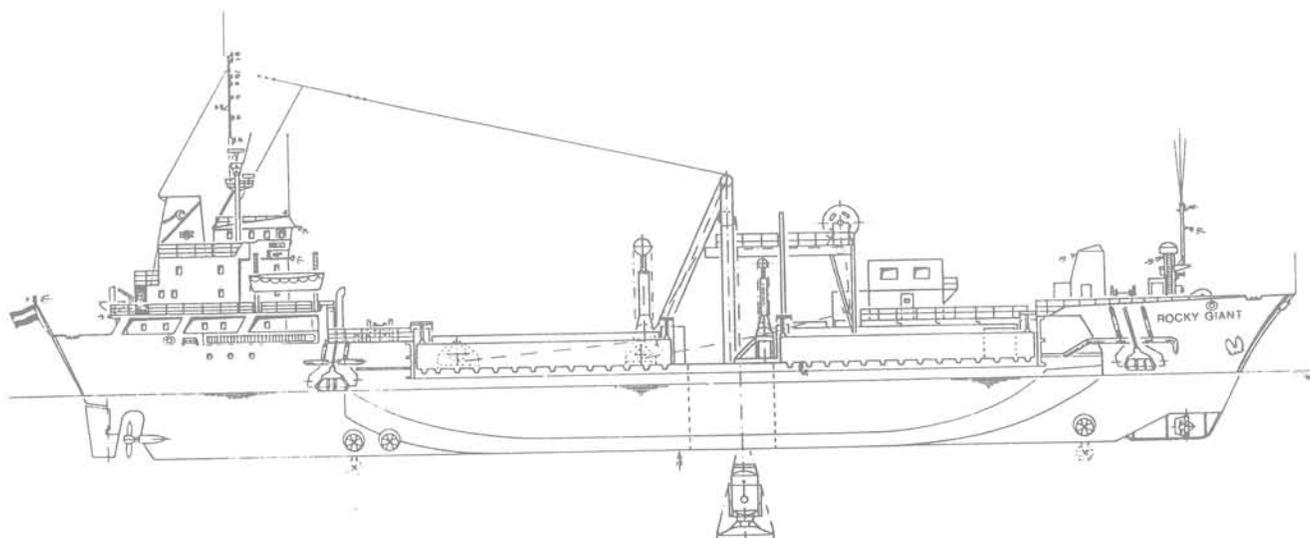


Fig. 15. — Le bateau « Rocky Giant » équipé de Geodoff.

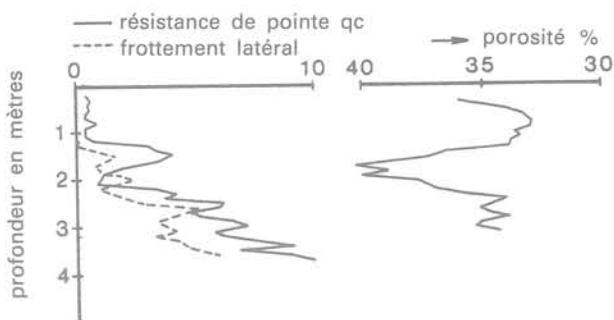


Fig. 14. — Essai d'intensité électrique le long du pipe-line.

### 3. UNE APPLICATION DU SYSTÈME MISSION II AU CANADA

Le projet de pose d'un câble électrique entre le Labrador et Terre-neuve dans le détroit de Belle-Isle nécessite la réalisation d'une tranchée dans le fond de la mer qui le protège contre les icebergs qui heurtent le fond. Au fond, le sol est constitué de quelques mètres de sable, gravier et pierres reposant sur la roche saine (calcaire ou grès).

Les conditions nautiques sont extrêmement difficiles: 110 mètres d'eau, une vitesse du courant jusqu'à 2 m/s, un vent qui arrive fréquemment à 7 Beaufort, même en bonne saison, causant une houle de 2 à 3 mètres. De plus il faut tenir compte du fait que les opérations seront interrompues par le passage d'icebergs.

En 1976 on avait tenté sans succès d'obtenir des carottes suivant la méthode traditionnelle depuis un

bateau. On a considéré que, dans ces conditions, seul un système submersible serait en mesure d'obtenir de bons résultats. Le système Mission II fut sélectionné en 1981 et équipé pour cette opération d'une foreuse à rotation. On a utilisé les carottiers Nassovia (carotte Ø 105 mm) et Longyear HQ (62 mm).

Le bateau « Rocky Giant » fut positionné dynamiquement avec des ancrs comme système de secours. Mission fut lancé dans la piscine au centre du bateau.

Au cours d'un mois on a réalisé 17 trous, soit au total 88 mètres, dont 42 m dans la roche.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. DE LEUW, E.H.; SILENCE, P. — *Contrôle in situ du compactage de remblais sous eau* — Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, no. 26-27, Paris 1983.
2. VAN DE GRAAF, H.C.; SMITS A.P. — *Offshore site investigation by rotary drilling from a diving bell* — Ground Engineering, January 1983.
3. Brochure. — *Density measurements in situ and critical density*: Laboratoire de Mécanique des Sols de Delft.
4. NIEUWENHUIS, J.K.; SMITS, F.P. — *The development of a nuclear probe in a cone penetrometer*. — Comptes rendus de ESOPT-II 1982, Amsterdam, Volume 2, 745-749.
5. VERMEIDEN, J. — *The submersible working chamber* — Delft Soil Mechanics Laboratory, 1977.
6. WAKELING, T.R.M. — *The Mission system, site investigation from a diving bell*. — Offshore Services, 1980.
7. SMITS, A.P. — *Mission II, now equipped for all seabed investigations*. — Second Canadian Conference in Marine Geotechnical Engineering, 1982.

## informations

### Livres reçus

Cours pratique de mécanique des sols

**J. Costet et G. Sanglerat**

Préface de **J. Biarez**

**Tome 1: Plasticité et calcul des tassements.**

Dunod, 3<sup>e</sup> éd., 1981, 312 pages, 121 fig., 15,5 × 24, broché, 173 FF, I.S.B.N. 2.04.011334.7

**Tome 2: Calcul des ouvrages.**

Dunod, 3<sup>e</sup> éd., 1983, 464 pages, 180 fig., 15,5 × 24, broché, 259 FF, I.S.B.N. 2.04.015523.6

C'est pour faciliter un premier contact avec la mécanique des sols que ce cours pratique a été conçu, sans toutefois tomber dans une simplification par trop radicale. Ce cours se veut didactique, mais il n'évite pas les difficultés bien au contraire. Dans ses deux tomes, il aborde la théorie, la pratique des calculs, les essais de laboratoire et donne également un éclairage sur certains procédés de construction.

Dans un premier tome, sont décrits les différents types de sols et leurs propriétés mécaniques (perméabilité, compressibilité, résistance au cisaillement), la notion de contrainte effective, introduite avec un soin tout particulier, en raison de son importance et de sa grande difficulté réelle sous une simplicité apparente. Un chapitre entier est particulièrement consacré à l'équilibre plastique, sujet aride mais essentiel que, grâce à leur longue expérience, les auteurs ont traité avec une grande rigueur en faisant une large place à la démonstration du théorème des états correspondants.

Le deuxième tome du cours aborde la théorie des ouvrages les plus courants: murs de soutènement, rideaux de palplanches, parois moulées, fondations superficielles ou profondes, talus et stabilité des pentes. Cette deuxième partie traite aussi des différents procédés de reconnaissance in situ et décrit avec soin deux des dispositifs les plus employés: pénétromètre et pressiomètre.

A l'occasion de la 3<sup>e</sup> édition de l'ouvrage, de nombreuses adjonctions ont été faites pour tenir compte de l'état actuel des connaissances et des techniques, en particulier en ce qui concerne les nouvelles techniques de compactage, les murs de soutènement en terre armée, la résistance des pieux aux efforts horizontaux, les argiles gonflantes et le soulèvement des fonds de fouille, la technique du cloutage des sols, et surtout l'utilisation des géotextiles qui font l'objet d'une annexe complète illustrée de 12 figures.

Dans tout l'ouvrage, le lecteur trouvera les données essentielles de chaque sujet, mais aussi les références suffisantes pour permettre d'approfondir tel point particulier. Bien que ce cours pratique soit essentiellement destiné aux étudiants de troisième cycle et aux élèves des grandes écoles, il sera lu avec profit par les ingénieurs débutants, que leur carrière les conduise sur le chantier ou dans un bureau d'études. Il peut aussi rendre des services aux techniciens supérieurs, car les chapitres d'application sont d'un niveau mathématique très élémentaire.

Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondations

**G. Sanglerat, G. Olivari, B. Cambou**

Préface de **J. Kerisel**

*Dunod, 2<sup>e</sup> édition, 1983*

**Tome 1: Généralités. Plasticité. Calcul des tassements. Interprétation des essais in situ.**

352 pages, 15,5 × 24, broché, 228 FF, I.S.B.N. 2.04.015497.3

**Tome 2: Calcul des soutènements et des fondations. Stabilité des pentes.**

256 pages, 15,5 × 24, broché, 186 FF, I.S.B.N. 2.04.015536.8

La connaissance des propriétés des sols est fondamentale pour la stabilité des constructions. Le calcul des

ouvrages d'art et des fondations, associé à des essais in situ, est indispensable pour éviter beaucoup d'accidents et de dépenses inutiles dues aux modifications de projets en cours d'exécution.

Au-delà du « Cours pratique de mécanique des sols » existant dans la même collection, l'ouvrage en deux volumes de G. Sanglerat, G. Olivari, B. Cambou, premier de ce type publié par des auteurs français, présente les solutions détaillées de 160 problèmes illustrés de nombreuses figures et tableaux, couvrant tout le domaine de la mécanique des sols et des fondations.

Y figurent les rubriques suivantes : propriétés physiques des sols (y compris la congélation de sol avec calcul d'un mur de glace), compressibilité et calcul des tassements, résistance au cisaillement, plasticité, calculs pratiques des ouvrages d'art : murs de soutènement, parois moulées et palplanches avec ou sans ancrages précontraints, talus, digues et barrages en terre (stabilité et débit de fuite), ainsi que murs de soutènement en terre armée. Des calculs de fondations superficielles et fondations profondes dans différents types de sol, y compris les argiles gonflantes sont également présentés.

Un chapitre complet est consacré à l'interprétation pratique des essais in situ (pénétromètre statique,

pénétromètre dynamique, pressiomètre et standard pénétration test).

La plupart des problèmes ont été résolus en utilisant les unités légales actuelles (système M.K.S.A.), mais, parce qu'il s'agit d'ouvrages pratiques, certains exemples ont été volontairement traités en systèmes anciens ou en unités anglo-saxonnes (pouces, pieds, pieds carrés, livre par pied carré, livre par pied cubique, etc.), fort utiles aux ingénieurs qui ont à examiner des projets ou des rapports dans lesquelles figurent encore ces unités.

Cet ouvrage sera donc d'une grande utilité non seulement aux étudiants des écoles d'ingénieurs ou d'université qui abordent pour la première fois la mécanique des sols, mais aussi aux ingénieurs et praticiens de Génie Civil déjà chevronnés mais qui ont à traiter de ce sujet. Les spécialistes de mécanique des sols trouveront, quant à eux, des solutions à certains problèmes rarement présentées dans la littérature technique.

Cette seconde édition comporte dix nouveaux problèmes concernant particulièrement l'interprétation des essais de pénétration statique ou dynamique et du S.P.T., l'analyse du soulèvement en fond de fouille en milieu cohérent, et l'étude de stabilité de remblais sur sol mou.