408062
408046

Photo de couverture :
Assemblée nationale, Paris. Parking enterré de 5 étages ; paroi moulée de 43 mètres de profondeur avec ancrages précontraints provisoires et définitifs réalisés par Soletanche. (Cliché Soletanche.)

Cours pratique de mécanique des sols 1

Plasticité et calcul des tassements

Jean COSTET
Ancien élève de l'Ecole polytechnique
Ingénieur Général des Ponts et Chaussées

Guy SANGLERAT
Ingénieur civil des Ponts et Chaussées
Directeur de Sols Investigations
Professeur à l'Ecole centrale lyonnaise
Expert agréé par la Cour de Cassation

troisième édition

Dunod

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO
BIBLIOTECA

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire du Tome II XVII
Introduction XIX
Bibliographie générale XXI
Notations et symboles XXV
Note concernant les unités employées XXVII

CHAPITRE I. — Caractéristiques physiques des sols **1**

1.1 Généralités 1

1.2 Description et mesure des propriétés physiques des sols 2
1.2.1 Masse volumique et poids volumique apparents d'un sol 2
1.2.2 Porosité et indice des vides 2
1.2.3 Teneur en eau et degré de saturation 3
1.2.4 Mesures en laboratoire 4
1.2.5 Poids volumique déjaugé 5

1.3 Compactage 6
1.3.1 Définitions et facteurs d'influence 6
1.3.2 Essais de compactage en laboratoire 8
1.3.3 Vérification du compactage *in situ* et matériel de compactage 10

1.4 Procédés spéciaux de compactage 12
1.4.1 Compactage par explosifs 12
1.4.2 Vibroflottation et colonnes ballastées 16
1.4.3 Consolidation dynamique Ménard 18

1.5 Structure des sols 21
1.5.1 Morphologie 21
1.5.2 Mesures de laboratoire 24
1.5.3 Structures élémentaires. Densité relative 26

1.6 Propriété des fines particules 28
1.6.1 Propriétés colloïdales 28
1.6.2 Classement par familles 32
1.6.3 Limites d'Atterberg 37
1.6.4 Activité 37
1.6.5 Résistance des argiles à la compression simple 39
1.6.6 Sensitivité des argiles 40

1.7 Identification et classification des sols 41
1.7.1 Abaque de plasticité de Casagrande 41
1.7.2 Classification américaine du « Highway Research Board » 44

Bibliographie 45

Problèmes 46

CHAPITRE II. — **L'eau dans le sol** 48

2.1 Loi de Darcy 48
2.1.1 Charge hydraulique 48
2.1.2 Perméabilité 49
2.1.3 Mesures de la perméabilité en laboratoire 52
2.1.4 Relations entre le coefficient de perméabilité « k » et certaines caractéristiques physiques du milieu 56
2.1.5 Domaine de validité de la loi de Darcy 58
2.1.6 Perméabilités moyennes fictives verticale et horizontale des terrains stratifiés 60
2.2 Hydraulique souterraine 61
2.2.1 Généralisation de la loi de Darcy pour des écoulements à deux dimensions 61
2.2.2 Ecoulements de révolution à trois dimensions 65
2.2.3 Pompage en régime non permanent 70
2.2.4 Généralisation de la loi de Darcy aux milieux homogènes et anisotropes 73
2.3 Contraintes effectives 75
2.3.1 Postulat de Terzaghi 75
2.3.2 Ecoulements linéaires dans les sols saturés 78
2.4 Capillarité 82
2.4.1 Loi de Jurin 82
2.4.2 Moule kh 83
2.4.3 Cohésion apparente 86
2.5 Effet du gel dans le sol 86
2.5.1 Généralités 86
2.5.2 Critères de sensibilité au gel 87
2.5.3 Barrières de dégel 89
2.5.4 Procédés de construction par congélation 89
Bibliographie 92
Problèmes 93

CHAPITRE III. — **Calculs pratiques des tassements. Compressibilité et théorie de la consolidation** 95

3.1 Calcul des tassements 95
3.2 Calcul des contraintes effectives au sein du massif 99
3.2.1 Cas des charges ponctuelles 99
3.2.2 Cas des charges uniformément réparties 102
3.2.3 Adaptation de la distribution des contraintes de Boussinesq aux contraintes réelles 109
3.3 Coefficient de raideur 110
3.3.1 Hypothèse de Westergaard 110
3.3.2 Mesure du coefficient de raideur k_s *in situ* 111
3.3.3 Phénomènes de fatigue 114
3.4 Compressibilité 115
3.4.1 Œdomètre de Terzaghi 115

3.4.2 Indice de compression et module œdométrique 119
3.4.3 Détermination de la pression de surconsolidation 124
3.4.4 Prévisions des tassements à l'aide de l'appareil triaxial 129
3.4.5 Détermination de E' *in situ* 129
3.5 Consolidation 131
3.5.1 Consolidations primaire et secondaire 131
3.5.2 Théorie de Terzaghi et Fröhlich 133
3.5.3 Détermination de c_v à l'œdomètre 143
3.5.4 Retour sur le calcul des tassements 145
3.6 Tassements différentiels et tassements admissibles 148
3.7 Cas particulier des argiles gonflantes 151
3.7.1 Gonflement des sols surconsolidés 151
3.7.2 Retrait et gonflement des sols normalement consolidés 152
3.7.3 Conséquences 153
3.7.4 Comment reconnaître les sols gonflants 153
3.7.5 Précautions à adopter 156
Bibliographie 158
Problèmes 159

CHAPITRE IV. — **Plasticité et résistance au cisaillement** 163

4.1 Eléments de plasticité 163
4.1.1 Tenseur des contraintes 163
4.1.2 Tenseur des déformations 169
4.1.3 Critères de plasticité 175
4.1.4 Loi de Coulomb 183
4.2 Essais de cisaillement 189
4.2.1 Boîte de Casagrande 189
4.2.2 Appareil triaxial 193
4.2.3 Différents types d'essais 200
4.3 Résultats expérimentaux pour les milieux pulvérulents 212
4.3.1 Angle de frottement interne et porosité 213
4.3.2 Variations de volume au cours du cisaillement 216
4.4 Résultats expérimentaux pour les milieux cohérents 219
4.4.1 Paramètres de Hvorslev 220
4.4.2 Frottement interne et cohésion des argiles 224
4.5 Signification et rôle des essais 229
Bibliographie 233
Problèmes 234

CHAPITRE V. — **Équilibre plastique** 236

5.1 Tenseur des contraintes 236
5.1.1 Cercle de Mohr 236
5.1.2 Condition de Coulomb 240

5.2 Équilibre de Rankine 243
5.2.1 Equilibres « inférieur » et « supérieur » 243
5.2.2 Lignes de glissement 245
5.2.3 Distribution des contraintes 247
5.2.4 Déformations du massif en équilibre limite 250
5.3 Équilibre de Boussinesq 251
5.3.1 Influence de la rugosité de l'écran 251
5.3.2 Calcul des coefficients de poussée $K\gamma$ et $k\gamma$ 254
5.3.3 Ecrans très inclinés 260
5.3.4 Lignes de glissement 263
5.4 Milieux non pesants 264
5.4.1 Définition du milieu non pesant. Equilibre de Rankine 264
5.4.2 Généralisation de l'équilibre de Rankine 264
5.4.3 Calcul des coefficients K_q et k_q 266
5.5 États correspondants 269
5.5.1 Méthode de Sokolovski 271
5.5.2 Théorème des états correspondants 275
5.5.3 Similitude des zones plastiques 276
Bibliographie 276
Problèmes 277
INDEX 278

SOMMAIRE DU TOME II

CHAPITRE VI. — **Murs de soutènement.**
6.1 Coin de glissement et poussée.
6.2 Poussée sur les murs de soutènement gravitaires.
6.3 Stabilité des murs poids.
6.4 Murs de soutènement en béton armé.
6.5 Nouveaux types de soutènement.
6.5.1 Cribwalls
6.5.2 Terre armée.
6.5.3 Cloutage.

CHAPITRE VII. — **Rideau de palplanches.**
7.1 Palplanches et butée.
7.2 Calcul classique des rideaux de palplanches.
7.3 Nouvelles méthodes de calcul des rideaux ancrés.
7.4 Condition de renard.
7.5 Blindage des fouilles.
7.6 Soulèvement de fond de fouille.

CHAPITRE VIII. — **Parois moulées.**
8.1 Utilisation des parois moulées.
8.2 Thixotropie de la boue à la bentonite.
8.3 Stabilité d'une tranchée remplie de boue à la bentonite.
8.4 Pathologie des parois moulées.

CHAPITRE IX. — **Fondations superficielles.**
9.1 Semelles et radiers.
9.2 Facteurs de capacité portante.
9.3 Calcul des fondations superficielles.
9.4 Répartition des contraintes sous les fondations.
9.5 Projets de fondations.

CHAPITRE X. — **Fondations profondes.**
10.1 Pieux et puits.
10.2 Formules de battage.
10.3 Essais de chargement de pieux en place.
10.4 Détermination statique de la charge portante.
10.5 Pénétromètre et fondations profondes.
10.6 Groupes de pieux.
10.7 Colonnes ballastées.

CHAPITRE XI. — **Talus et digues.**

11.1 Glissements de terrains.
11.2 Calcul de la stabilité des talus.
11.3 Influence des écoulements d'eau sur la stabilité des talus.
11.4 Remblais, digues et barrages.

CHAPITRE XII. — **Reconnaissance des sols.**

12.1 Essais *in situ*.
12.2 Scissomètre, rhéotest, pressiomètre.
12.3 Essais de battage.
12.4 Pénétromètre statique.
12.5 Pathologie des fondations.

INDEX.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

I. TRAITÉS GÉNÉRAUX.

BRINCH HANSEN J. et LUNDGREN. — *Hauptprobleme der Bodenmechanik*. Springer Verlag. Berlin, 1960.

CAQUOT A. et KÉRISEL J. — *Traité de mécanique des sols* (4e édition). Gauthier Villars. Paris, 1966.

FILLIAT G. — *La pratique des sols et fondations*. Editions du Moniteur. Paris, 1981.

LAMBE W. T. and WHITMAN R. — *Soil Mechanics*. John Wiley, London, New-York, 1968.

LEONARDS G. A. — *Les fondations* (traduit et adapté par un groupe d'ingénieurs des laboratoires des ponts et chaussées). Dunod, 1968.

NAVDOCKS. — *Design Manual*. Nav docks DM 7, Washington, D. C., 1967.

NEWMARK N. M. and ROSENBLUETH E. — *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. London, 1971 - 640 pages.

OBERT L. and DUVALL W. I. — *Rock mechanics and the design of structures in Rock*. John Wiley, London, New-York, 1967.

PECK R. B., HANSON W. E. and THORNBURN T. H. — *Foundations Engineering*. John Wiley, New-York, 1974 - 514 pages.

STAGG K. G. and ZIENKIEWICZ O. C. — *Rock Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley, London, New-York, Sydney, Toronto, 1969 - 442 pages.

TAYLOR D. W. — *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley. New-York, 1956 - 700 pages.

TSCHEBOTARIOFF G. — *Soil Mechanics, Foundations and Earth Retaining Structures*. McGraw Hill. New-York, 1973 - 642 pages.

YONG, R. N. and WARKENTIN, B. P., *Soil Properties and Behavior*, Geotechnical Engineering 5, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1975.

ZIENKIEWICZ O. C., LEWIS R. W. and STAGG K. G. — *Numerical Methods in offshore Engineering*. John Wiley, New-York, 1978 - 582 pages.

ZIENKIEWICZ O. C. — *The Finite Element Method* (Third Edition). Mc Graw Hill, New-York, 1977 - 787 pages.

II. MANUELS DE LABORATOIRE.

Department of the Army (1980), Laboratory Soils Testing, Engineer Manual, EM 1110-2-1906, Headquarters Department of the Army, Office of the Chief of Engineers.

LAMBE T. W. — *Soil testing for engineers* (M.I.T.). John Wiley. New-York, 1951.

III. COMPTES RENDUS DES CONGRÈS INTERNATIONAUX.

Proceeding of the first international conference on soil mechanics and foundations engineering. Cambridge, juin 1936, Harvard University Cambridge, Mass.

Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering. Rotterdam, juin 1948. Imprimé par G. Keesmaat, Haarlem.

Comptes rendus du troisième congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Zurich, août 1953. Imprimé par Berichthaus Zurich.

Proceedings of the fourth conference on soil mechanics and foundation engineering. Londres, août 1957. Butterworths scientific publications.

Comptes rendus du 5e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Paris, juill. 1961. Dunod.

Comptes rendus du 6e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Montréal, sept. 1965. University of Toronto press.

Comptes rendus du 7e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Mexico, août 1969.

Comptes rendus du 8e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Moscou, août 1973.

Comptes rendus du 9e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Tokyo, juillet 1979.

Comptes rendus du 10e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Stockholm, juin 1981. Balkema-Rotterdam.

Comptes rendus du 11e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. San Francisco, août 1985.

Comptes rendus des congrès régionaux de mécanique des sols (Europe, Afrique, Asie et Amérique) en particulier, San Juan de Porto-Rico 1971, Bangkok 1971, Madrid 1972, Vienne 1976, Brighton 1979, Helsinki 1983, Dublin 1987.

IV. REVUES.

Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics. Paris.

Géotechnique, the international journal of soils mechanics publié par *the Institution of civil engineers*. Londres.

Journal of the geotechnical engineering division. Proceedings of the american society of civil engineers. (ASCE) New York.

Proceedings of the institution of civil engineers. Londres.

Revue française de Géotechnique. Paris.

Revue Canadienne de Géotechnique.

Ground engineering. Londres.

L.G.M., mededelingen-Delft, Hollande.

V. DIVERS.

KÉRISEL J. — *Historique de la mécanique des sols en France jusqu'au XXe siècle* Annales des ponts et chaussées, juill.-août 1958.

Lexique technique en anglais, français, allemand, suédois, portugais et espagnol de termes employés en mécanique des sols (3e édition) publié par la société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondations. Zurich, 1968.

VERDEYEN J. — *Quelques notes sur l'histoire de la mécanique des sols*. Presses universitaires de Bruxelles. Bruxelles, 1959.

VISSER A. D. — *Dictionnaire Elsevier de mécanique des sols en quatre langues (anglais, américain, français, hollandais et allemand)*. Dunod. Paris, 1965.

Une bibliographie particulière est donnée à la fin de chaque chapitre.