

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome

2

Exercices et applications
de mécanique des sols

Sous la direction
de Claude Plumelle

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

Sommaire

Avant-propos	7
Mode d'emploi	9
Présentation des auteurs	11
Introduction	13
CHAPITRE 1 Identification et classification des sols.....	15
CHAPITRE 2 Déformations et contraintes dans les massifs de sols.....	47
CHAPITRE 3 Consolidation et fluage des sols	85
CHAPITRE 4 Lois de comportement	131
CHAPITRE 5 Mécanique des sols non saturés.....	223
CHAPITRE 6 Hydraulique des sols.....	249
CHAPITRE 7 Essais de laboratoire.....	289
CHAPITRE 8 Essais <i>in situ</i>	315
CHAPITRE 9 Actions du sol sur un écran	351
CHAPITRE 10 Stabilité de pentes	415
Index	497
Table des matières.....	501



Avant-propos

Vouloir exercer le métier de géotechnicien sans bases théoriques solides est très dangereux. Réciproquement, aborder la seule théorie sans la pratique du bureau d'études et du chantier conduit à l'impasse lorsqu'il s'agit de construire, car comme l'enseigne le vieil adage : c'est au pied du mur que l'on voit le maçon ! Le géotechnicien doit donc tout autant maîtriser la théorie que la pratique, ces deux domaines échangeant et s'enrichissant constamment l'un l'autre.

Il nous a donc paru intéressant d'ajouter à l'ouvrage *Théorie et Pratique de la Géotechnique* un second tome consacré à des applications de mécanique des sols. Ce tome 2 s'appuie principalement sur les chapitres suivants de *Théorie et Pratique de la Géotechnique, tome 1* :

- Chapitre 5 : Identification et classification des sols
- Chapitre 6 : Déplacements et déformations des massifs de sol
- Chapitre 7 : Contraintes dans les massifs de sol
- Chapitre 8 : Consolidation et fluage des sols
- Chapitre 9 : Généralités sur les lois de comportement des sols
- Chapitre 10 : Lois de comportement élastique – parfaitement plastique
- Chapitre 11 : Lois élasto-plastiques avec écrouissage
- Chapitre 12 : Comportement des sols non saturés
- Chapitre 13 : Hydraulique des sols
- Chapitre 14 : Essais de laboratoire
- Chapitre 15 : Essais in situ,
- Chapitre 17 : Actions du sol sur un écran
- Chapitre 18 : Mouvement de terrain et stabilité des pentes.

Théorie et Pratique de la Géotechnique, tome 2 bénéficie de l'expérience en bureau d'études, en laboratoire de recherches, et en enseignement des auteurs, Laurent Briançon, Yu Jun Cui, Jean-Pierre Gourc et Claude Plumelle.

Cet ouvrage propose des exercices tirés de résultats démontrés dans le tome 1, ainsi que des applications plus larges inspirées de l'esprit de notes de calcul de BET. Il utilise tous les outils à la disposition du géotechnicien, les formules, les normes, les abaques, et les logiciels de calcul couramment utilisés dans la profession.

Je remercie tous mes collègues pour leur précieuse collaboration, mais également le bureau d'études Antea Group, en particulier Christophe Poinclou, le directeur de son laboratoire de mécanique des sols, et son équipe qui nous ont fourni des essais récents de laboratoire.

Claude Plumelle

Mode d'emploi

Théorie et Pratique de la Géotechnique, tome 2 est composé de 10 chapitres qui reprennent les titres de *Théorie et Pratique de la Géotechnique, tome 1*.

Figure en début de chaque chapitre, un chapeau introductif qui contextualise et/ou resitue les différents exercices et applications présentés : il s'agit notamment de précisions sur les liens avec le tome 1, de rappels sur des notions clés, la démarche adoptée et les objectifs souhaités.

Les exercices et applications sont structurés de manière identique à savoir :

- un énoncé suivi d'une liste de questions numérotées ;
- un corrigé constitué des réponses commentées et illustrées.

Au fil du texte courant sont extraits certaines phrases ou paragraphes qui sont traitée comme des remarques. Chacune de ces « incises » porte un titre caractérisant son contenu (recommandations, commentaires, important, documentation, bibliographie...).

Les renvois sont rédigés ainsi : (§ 1), (§ 1.1), (§ 1.1.1), (chap. 1) ou chapitre 1.

Les tableaux, figures et photos, annoncés dans le texte, sont numérotés en reprenant le numéro du chapitre dans lequel ils se situent, suivis du numéro correspondant à leur ordre d'apparition : tableau 1.1, figure 1.1, photo 1.1.

Toutes les références aux équations, figures et paragraphes du tome 1 sont notées entre crochets sous la forme : [TPG équ.1.1], [TPG fig. 1.1], [TPG § 1.1].

Les nouvelles équations sont suivies d'un numéro entre crochets ferré à droite : [1.1]. Elles sont annoncées dans le texte courant sous la forme : (...) équation 1.1.



Présentation des auteurs

Professeur honoraire du Cnam, **Claude Plumelle** a eu une carrière d'enseignant, d'ingénieur-conseil et de chercheur. Il a dirigé la chaire de géotechnique du Cnam de 1994 à 2005, période au cours de laquelle il a développé le cursus d'ingénieur géotechnicien de cet établissement et créé, avec l'université Paris VI, le master commun géologie-géotechnique. Dans ses activités en recherche-développement, il a été très impliqué dans les projets nationaux : Clouterre, Forever et Asiri. Il est membre de la commission technique et du conseil du Comité français de mécanique des sols et de la géotechnique (CFMS) depuis 1985. [Chapitres 1 à 4, 6, 8, 9 et 10].

Laurent Briançon a été maître de conférences à la chaire de géotechnique du Conservatoire national des arts et métiers de 2003 à 2012. Il a ensuite exercé la fonction de directeur de projets en infrastructures dans la société Antea Group. Il est depuis 2014 maître de conférences à l'INSA de Lyon. Laurent Briançon est également un des commissaires de l'exposition « les dessous des grands travaux » présentée actuellement au musée des arts et métiers (2013-2018). Il mène depuis 2003 une activité de recherche expérimentale dans les domaines de l'amélioration des sols et des géosynthétiques. Il est également membre élu du comité technique du CFMS depuis 2013. [Chapitres 1, 7 à 10].

Directeur de recherche et professeur à l'école des Ponts ParisTech (ENPC), **Yu Jun Cui** est spécialisé en mécanique des sols non saturés et dans ses applications concernant le stockage des déchets nucléaires, l'interaction sol-végétation-atmosphère, la géotechnique ferroviaire, la construction des remblais, l'utilisation des sols traités. [Chapitre 5].

Professeur émérite à l'université Joseph-Fourier – Grenoble, **Jean-Pierre Gourc** a enseigné depuis sa création à la filière ingénieur géotechnicien de Polytech Grenoble. Dans le domaine de la recherche, ses domaines d'expertise sont les géosynthétiques, le traitement et le stockage des déchets et plus largement la géotechnique environnementale. [Chapitre 10].

Introduction

L'exercice de la géotechnique est difficile. C'est un domaine complexe dans le monde du génie civil, car comme le disait Karl Terzaghi en 1936 « *Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex* ». Contrairement à l'acier et au béton, matériaux préfabriqués, le sol est en effet naturel et s'avère bien différent à chaque projet ! Mais ce constat ne doit pas décourager le géotechnicien. Il doit au contraire l'inciter, pour chacune de ses missions, à déterminer les caractéristiques physiques, mécaniques, hydrauliques avec la plus grande fiabilité en croisant les essais de laboratoire et les essais in-situ, mais également en utilisant sa propre expérience et celle de la communauté géotechnique.

Les lois de comportement doivent être adaptées en fonction de la nature du sol et du type d'ouvrages. Elles ne sont pas aussi « parfaites » que pour l'acier et le béton ; la première conséquence est que les résultats des calculs ne peuvent pas être aussi précis que ceux effectués pour les structures, la seconde est qu'il est souvent conseillé et parfois obligatoire d'instrumenter les ouvrages de géotechnique pour confronter les modèles de calcul au comportement réel de ceux-ci. Les retours d'expérience de chantier sont fondamentaux en géotechnique : ils permettent de caler les lois de comportement, les paramètres de calcul et participent à une meilleure connaissance des ouvrages. Et si le géotechnicien dispose d'une boîte à outils (lois rhéologiques, formules théoriques, abaques, retours d'expérience, bibliographie, logiciels) qui lui permet de concevoir un ouvrage et de calculer ses composantes, il ne doit jamais oublier que la réalité est sur le chantier.

Ce livre propose des exercices et des applications sur le dépouillement d'essais physiques et mécaniques suivant les normes françaises actuelles et provenant de sites récents. Il développe les calculs de déformations et de contraintes avec des exercices théoriques et des applications pratiques. Les applications concernant la consolidation reposent sur le comportement de sols compressibles sous l'action de remblais, de préchargements, de rabattement de nappe, et introduisent le rôle des réseaux de drains verticaux. Un chapitre important est consacré aux lois de comportement élastique parfaitement plastique et aux lois élastoplastiques avec écrouissage, en développant la méthode convergence – confinement des tunnels, la répartition des contraintes en profondeur dans le sol, l'exploitation des résultats d'essais triaxiaux et la détermination expérimentale de la surface de charge de l'argile de Cubzac-Le-Ponts. Un chapitre complet traite de la mécanique des sols non saturés. L'hydraulique des sols est illustrée par des applications sur l'écoulement de l'eau pour un batardeau ou une fouille et met l'accent sur les difficultés de l'étude prévisionnelle des niveaux d'eau de projet. L'action du sol sur un écran sous l'effet des poussées et butées est développée par les trois méthodes de Coulomb, Rankine et Boussinesq (tables de Kérisel et Absi), ainsi que par les calculs des écrans (butonnés en tête, simplement butés en pied, en console) traités à l'équilibre limite. Le dernier chapitre, sur la stabilité des pentes et des remblais sur sols mous, utilise différentes approches, analytique, équilibre limite, calcul à la rupture, ainsi que des formules, abaques et résultats issus de logiciels.

L'ensemble de ces exercices et applications provient de l'expérience en bureau d'études, en laboratoire de recherches, et en enseignement de chacun des auteurs. Il bénéficie également de données d'entreprises et de laboratoires, de publications, par exemple pour l'argile de Cubzac-Le-Ponts, ainsi que d'articles et rapports de recherche du laboratoire des Ponts et Chaussées (actuellement Ifsttar).



Identification et classification des sols

Ce chapitre propose des exercices et des applications sur les modèles de sol et les valeurs comparées des limites d'Atterberg déterminées à la coupelle et au cône. Il traite des essais de retrait et de la détermination de la susceptibilité vis-à-vis du retrait – gonflement des argiles. Enfin, il classe les sols suivant le GTR 2000.

1.1 Modèle élémentaire d'un sol (1/2)

1.1.1 Énoncé

Soit un limon de caractéristiques suivantes : $\gamma_d = 15,8 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 19,18 \text{ kN/m}^3$ et $S_r = 82,4 \%$

Question n° 1

Établissez le modèle élémentaire de ce sol.

Question n° 2

En déduire le poids volumique des particules solides γ_s , l'indice des vides e , la porosité n et la teneur en eau w .

Question n° 3

Refaire le modèle élémentaire de ce sol pour $S_r = 100 \%$. En déduire le poids volumique déjaugé γ' .

1.1.2 Corrigé

Réponse n° 1

On établit le modèle élémentaire du sol pour un volume de 1 m^3 (figure 1.1).

$$W = \gamma \times V = 19,18 \text{ kN}$$

$$\text{soit } W_s = \gamma_d V = 15,8 \text{ kN et } W_w = W - W_s = 3,38 \text{ kN.}$$

$$V_w = W_w / \gamma_w = 0,338 \text{ m}^3$$

$$\text{soit } S_r = V_w / (V_w + V_a) \Rightarrow V_a = 0,072 \text{ m}^3 \text{ et } V_s = V - V_a - V_w = 0,59 \text{ m}^3.$$

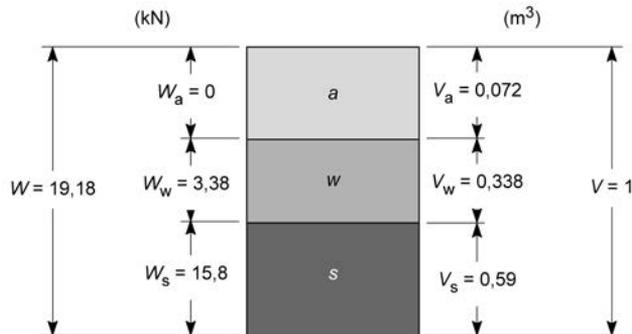


Figure 1.1. Modèle élémentaire du sol humide

Réponse n° 2

$$\gamma_s = (W_s / V_s) = 26,78 \text{ kN/m}^3 \text{ d'où } e = V_v / V_s = 0,69.$$

$$n = V_v / V = 0,41 \text{ et } w = (W_w / W_s) \times 100 = 21,4 \text{ \%}.$$

Réponse n° 3

On reprend le modèle élémentaire du sol humide et on remplace le volume d'air par un volume d'eau. Le volume total reste inchangé pour un sol qui n'est pas susceptible de retrait-gonflement, seul le poids de l'échantillon augmente (figure 1.2).

$$\gamma' = (W / V) - \gamma_w = 9,9 \text{ kN/m}^3.$$

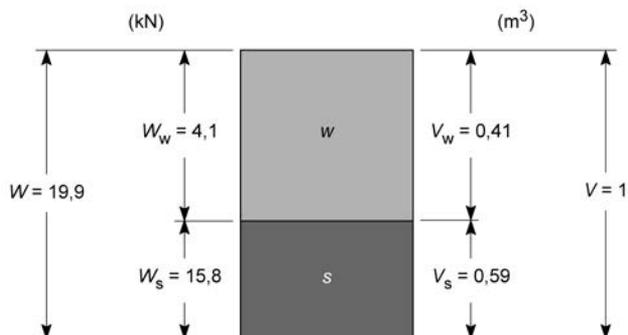


Figure 1.2. Modèle élémentaire du sol saturé

1.2 Modèle élémentaire d'un sol (2/2)

1.2.1 Énoncé

Soit un limon argileux de caractéristiques suivantes : $\gamma_d = 15,2 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_s = 26,8 \text{ kN/m}^3$ et $w = 10 \%$.

Question n° 1

Établissez le modèle élémentaire de ce sol.

Question n° 2

En déduire le poids volumique γ , l'indice des vides e , la porosité n et le degré de saturation S_r .

Question n° 3

On sature ce sol, établissez à nouveau le modèle élémentaire et déduisez en le poids volumique saturé γ_{sat} ainsi que le poids volumique déjaugé γ' .

Question n° 4

Est-ce que la saturation d'un échantillon de sol modifie son indice des vides ? Pourquoi ?

1.2.2 Corrigé

Réponse n° 1

On établit le modèle élémentaire du sol pour un volume de 1 m^3 (figure 1.3).

$W_s = \gamma_d \times V = 15,2 \text{ kN}$, $V_s = W_s / \gamma_s = 0,567 \text{ m}^3$ et $W_w = w \times W_s = 1,52 \text{ m}^3$.

$V_w = W_w / \gamma_w = 0,152 \text{ m}^3$, $W = W_w + W_s = 16,72 \text{ kN}$ et $V_a = V - V_s - V_w = 0,281 \text{ m}^3$.

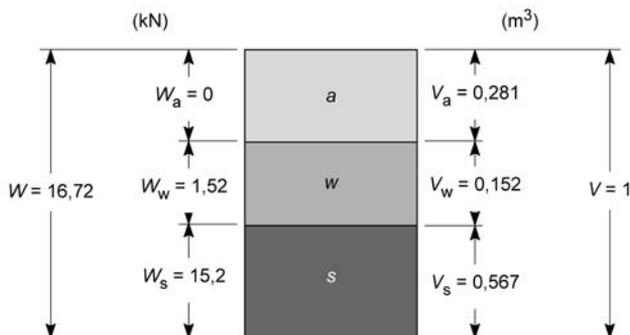


Figure 1.3. Modèle élémentaire du sol humide

Réponse n° 2

$\gamma = (W / V) = 16,72 \text{ kN/m}^3$ et $e = V_v / V_s = 0,76$.

$n = V_v / V = 0,43$ et $S_r = (V_w / V_v) \times 100 = 35,1 \%$.

Réponse n° 3

On reprend le modèle élémentaire du sol humide et on remplace le volume d'air par un volume d'eau. Le volume total reste inchangé pour un sol qui n'est pas susceptible de retrait-gonflement, seul le poids de l'échantillon augmente (figure 1.4).

$\gamma_{\text{sat}} = (W / V) = 19,53 \text{ kN/m}^3$ et $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 9,53 \text{ kN/m}^3$.

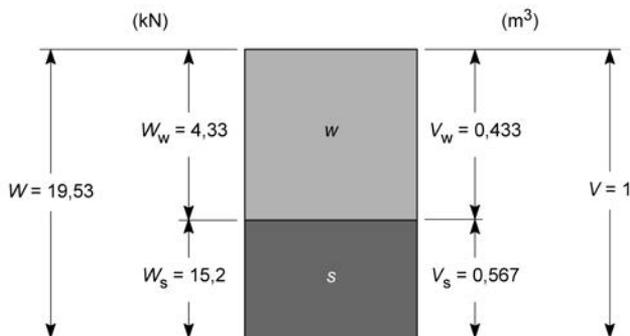


Figure 1.4. Modèle élémentaire du sol saturé

Réponse n° 4

La saturation d'un échantillon de sol ne modifie pas son indice des vides pour un sol qui n'est pas susceptible de retrait-gonflement. En effet l'indice des vides est, par définition, le rapport entre le volume solide et le volume des vides qui ne varie pas si le sol ne gonfle pas quand il passe de l'état non saturé à l'état saturé.

Pour un sol susceptible de retrait-gonflement, on se reportera à l'application 1.5.

1.3 Essais de consistance (Limite d'Atterberg)

1.3.1 Énoncé

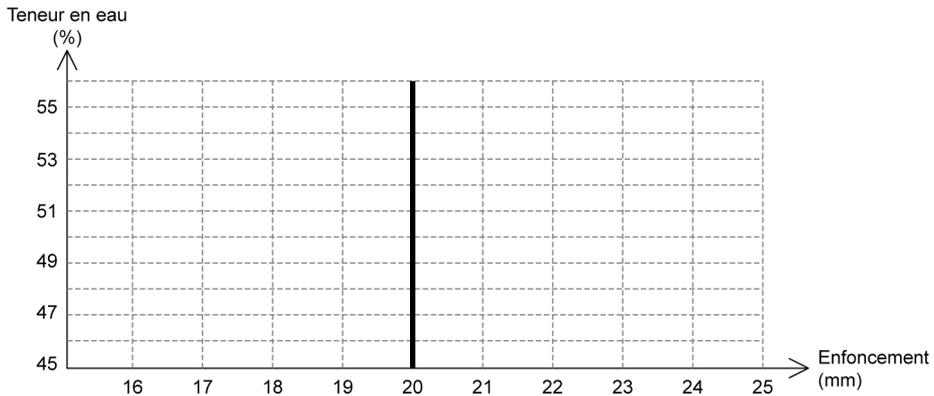
Des essais de consistance sont réalisés sur une argile prélevée entre 1,4 m et 1,7 m de profondeur. Il est demandé de compléter les procès-verbaux de ces essais (figures 1.5 et 1.6).

Question n° 1

Calculer les limites de liquidité déterminées à partir des essais au pénétromètre à cône et à la coupelle de Casagrande.

Échantillon		Affaire
Échantillon	SC1	Exploitation de gisement
Profondeur	1,40 à 1,70 m	
Nature	Kaolinite blanche, raide et cassante	

Limite de liquidité W_L	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Étuvage	105 °C	
Affichage initial L1	- 6,678	- 6,534	- 6,660	- 6,788	Limite de plasticité W_P		
Affichage final L2	9,252	11,874	15,185	17,420			
Enfoncement $E = L1 - L2$	15,930	18,408	21,845	24,208			
N° de la tare	1	2	3	4	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M_A = masse totale humide (sol + tare)	5,66	4,14	4,02	4,21	5,64	4,77	
M_B = masse totale sèche (sol + tare)	3,98	2,89	2,74	2,82	4,32	3,67	
M_C = masse tare	0,29	0,29	0,30	0,30	0,32	0,31	
Masse de l'eau							
Masse du sol sec							
Teneur en eau							



Teneur en eau correspondant à un enfoncement de 20 mm : $W_L =$ $W_P =$

Indice de plasticité $I_P = W_L - W_P =$

W naturelle (%) = 18,8 ; Indice de consistance I_C (*) =

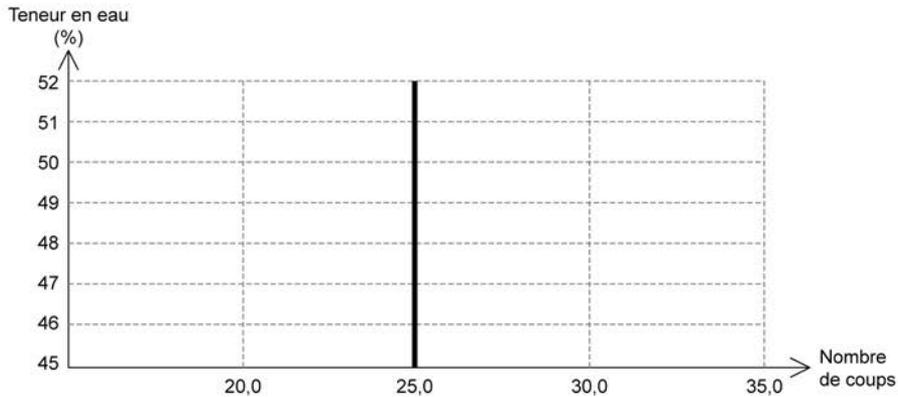
(*) : paramètre à prendre en compte lorsque $I_P > 12$ et particules $\leq 80 \mu\text{m} > 35 \%$

Figure 1.5. Essais au cône et de plasticité conformes à la norme P94-512-12 (source : Antea Group)

Échantillon		Affaire
Échantillon	SC1	Exploitation de gisement
Profondeur	1,40 à 1,70 m	
Nature	Kaolinite blanche, raide et cassante	

Étuvage	105 °C
---------	--------

Limite de liquidité W_L	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Limite de plasticité W_P		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Nombre de coups	15	22	29	35			
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	
M_A = masse totale humide (sol + tare)	8,86	7,81	9,65	7,01	5,64	4,77	
M_B = masse totale sèche (sol + tare)	5,96	5,37	6,71	4,92	4,32	3,67	
M_C = masse tare	0,32	0,30	0,32	0,31	0,32	0,31	
Masse de l'eau							
Masse du sol sec							
Teneur en eau							



Teneur en eau correspondant à 25 coups : $W_L =$ $W_P =$

Indice de plasticité $I_P = W_L - W_P =$

W naturelle (%) = 18,8 ; Indice de consistance I_C (*) =

(*) : paramètre à prendre en compte lorsque $I_P > 12$ et particules $\leq 80 \mu m > 35 \%$

Figure 1.6. Essais à la coupelle de Casagrande et de plasticité conformes à la norme NF P94-051 (source : Antea Group)

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome 2

Regroupant un ensemble d'exercices et d'applications de mécanique des sols, cet ouvrage complète les bases théoriques développées dans *Théorie et pratique de la géotechnique, tome 1*. Plus précisément, ce second volume propose des exercices théoriques et des applications pratiques inspirées de notes de calcul de bureaux d'études. De difficulté croissante, présentés avec leur solution commentée et illustrée, ils permettent d'utiliser la majorité des outils, formules, normes, abaques et résultats de logiciels de calcul utilisés par la profession.

Ce tome 2 propose des exercices et des applications sur le dépouillement d'essais physiques et mécaniques provenant de sites récents, suivant les normes françaises actuelles. Il développe les calculs de déformations et de contraintes, présente la consolidation et le comportement des sols sous l'action de remblais, de préchargements, de rabattement de nappe, et introduit le rôle des réseaux de drains verticaux.

Un chapitre important est consacré aux lois de comportement élastique parfaitement plastique et aux lois élastoplastiques avec écrouissage, en développant la méthode convergence – confinement des tunnels, la répartition des contraintes en profondeur dans le sol, l'exploitation des résultats d'essais triaxiaux et la détermination expérimentale de la surface de charge.

Un chapitre spécial traite de la mécanique des sols non saturés. L'hydraulique des sols est illustrée par des applications sur l'écoulement de l'eau pour un batardeau ou une fouille et met l'accent sur les difficultés de l'étude prévisionnelle des niveaux d'eau de projets. L'action du sol sur un écran, sous l'effet des poussées et butées, est développée à travers les méthodes de Coulomb, Rankine et Boussinesq (tables de Kérisel et Absi), ainsi que par les calculs des écrans traités à l'équilibre limite.

Enfin, en utilisant différentes approches – analytique, équilibre limite, calcul à la rupture –, le dernier chapitre traite de la stabilité des pentes et des remblais sur sols mous.

Cet ouvrage s'appuie sur les années d'expériences en bureau d'études, en laboratoire de recherches, et en enseignement de chacun des auteurs. Il s'adresse aussi bien aux géotechniciens de BET et d'entreprises souhaitant développer leurs acquis qu'aux étudiants et aux élèves ingénieurs désireux de mettre en pratique leurs connaissances de mécanique des sols.

Ont participé à la rédaction :

Laurent Briançon, maître de conférences à l'INSA de Lyon

Yu Jun Cui, professeur à l'école des Ponts ParisTech

Jean-Pierre Gourc, professeur émérite de l'université Joseph-Fourier – Grenoble

Claude Plumelle, professeur honoraire du CNAM

A assuré la direction de l'ouvrage :

Claude Plumelle

Sommaire

- ▶ Identification et classification des sols
- ▶ Déformations et contraintes dans les massifs de sols
- ▶ Consolidation et fluage des sols
- ▶ Lois de comportement
- ▶ Mécanique des sols non saturés
- ▶ Hydraulique des sols
- ▶ Essais de laboratoire
- ▶ Essais in situ
- ▶ Actions du sol sur un écran
- ▶ Stabilité de pentes

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

Photographie de couverture
© Stocksolutions – Fotolia.com

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-11904-6



9 782281 119046