Clément Desodt, Philippe Reiffsteck

Géotechnique

Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols, avec rappels de cours

2e ÉDITION

DUNOD

Conception graphique : Pierre-André Gualino

Illustration de couverture : © Richard Villalon - Adobestock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-080860-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

CHAPITRE 1 • **IDENTIFICATION DES SOLS**

1.1 Description d'un sol 1

1.2 Classification des sols 5

EXERCICES 7

SOLUTIONS DES EXERCICES 12

CHAPITRE 2 • **HYDRAULIQUE DES SOLS**

2.1 Écoulements en un milieu granulaire 21

2.2 Hydraulique des puits 24

EXERCICES 30

SOLUTIONS DES EXERCICES 38

CHAPITRE 3 • **ÉTATS DE CONTRAINTE DANS LES SOLS**

3.1 Contraintes totales et effectives 51

3.2 Influence du chargement 56

EXERCICES 58

SOLUTIONS DES EXERCICES 65

CHAPITRE 4 • **RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT**

4.1 Élastoplasticité 77

4.2 Essais de laboratoire 83

4.3 Essais *in situ* 87

EXERCICES 93

SOLUTIONS DES EXERCICES 101

CHAPITRE 5 • **TASSEMENTS**

5.1 Consolidation 117

5.2 Compressibilité 122

EXERCICES 126

SOLUTIONS DES EXERCICES 134

CHAPITRE 6 • **SOUTÈNEMENT**

6.1 Types d'ouvrages de soutènement 151
6.2 États limites 152
6.3 Murs-poids 155
6.4 Rideaux 157
EXERCICES 160
SOLUTIONS DES EXERCICES 165

CHAPITRE 7 • **PENTE ET TALUS**

7.1 Mouvements de terrains 173
7.2 Calcul de stabilité 174
7.3 Prise en compte des renforcements 178
EXERCICES 180
SOLUTIONS DES EXERCICES 188

CHAPITRE 8 • **FONDATIONS**

8.1 Technologie de fondations 206
8.2 Méthodes de calcul 208
EXERCICES 225
SOLUTIONS DES EXERCICES 235

CHAPITRE 9 • **PROBLÈMES GÉNÉRAUX**

EXERCICES 250
SOLUTIONS DES EXERCICES 257

ANNEXES

A. Distribution de contraintes dans un massif - abaques 271
B. Coefficient de consolidation 274
C. Coefficient de poussée/butée 276

INDEX 279

Avant-propos

L'étude des sols est un point-clé des projets de construction. Les travaux associés présentent un coût important, et les risques engendrés en cas de problèmes peuvent être conséquents.

La mécanique des sols est une science complexe nécessitant de bonnes connaissances théoriques et pratiques. La diversité des situations, des phénomènes, et la variabilité des paramètres peuvent effrayer l'étudiant. L'acquisition de méthodes de raisonnement dans la résolution d'exercices appliqués confèrera une efficacité et une adaptabilité face aux problématiques rencontrées.

Ce livre d'exercices corrigés s'adresse aux étudiants préparant leur BTS, DUT, licence, master et diplôme d'ingénieur. Il est adapté à la préparation des concours d'entrée en école d'ingénieurs, et des concours de recrutement des professeurs (agrégation, CAPET, etc.).

Trois niveaux de difficultés sont proposés :

★ : socle de connaissances.
★★ : connaissances approfondies (à partir de bac+2).
★★★ : connaissances avancées (master, cycle avancé d'école d'ingénieurs, CAPET, agrégation).

À chaque début de chapitre, des rappels de cours permettront d'avoir une synthèse des différentes méthodologies, des notations et des conventions utilisées. Ces rappels se limitent à l'essentiel et il est conseillé de se munir de ses cours et éventuellement d'un ouvrage de référence adapté au niveau d'étude.

Les résolutions omettent volontairement des cas particuliers et certaines étapes normatives parfois lourdes afin de se focaliser sur la démarche et les méthodes de calcul.

Le chapitre *Identification des sols* est essentiel pour définir les caractéristiques de base d'un sol. Les exercices visent à familiariser l'étudiant avec ces nombreux paramètres, et à comprendre leurs intérêts dans des applications concrètes.

Le chapitre *Hydraulique des sols* traite de cas concrets en lien avec les mouvements d'eau dans les aquifères, tels que l'exploitation d'un réseau d'écoulement, l'évaluation d'un débit de pompage ou d'un rabattement de nappe.

Le chapitre *États de contrainte dans les sols* présente des exercices permettant de déterminer en tout point d'un massif, et en fonction des charges appliquées, la distribution des contraintes totales et effectives.

Le chapitre *Résistance au cisaillement* s'intéresse aux problèmes de rupture des sols, essentiels pour aborder l'étude du comportement des ouvrages. De nombreux exercices exploitent des résultats d'essais *in situ* et de laboratoire.

Le chapitre *Tassements* permettra à l'étudiant d'estimer, par différentes méthodes, les valeurs des tassements, globaux ou différentiels, en fonction du temps.

Les derniers chapitres *Soutènement*, *Pente et talus* et *Fondations* présentent de nombreux problèmes en lien avec l'interaction sol/structure. Les calculs de résistance des matériaux structuraux ne seront pas traités.

Des exercices supplémentaires sont également téléchargeables sur :
www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100720477

Ressources bibliographiques

De nombreuses ressources bibliographiques sont accessibles sur le site du comité français de mécanique des sols (CFMS) : www.cfms-sols.org (actes des journées techniques de l'association et des Journées Nationales de Géotechnique et Géologie) et sur le site de l'IFSTTAR : http ://madis-externe.ifsttar.fr (rapports de recherches, modes opératoires, guides).

De nombreux articles et thèses sont aussi archivés sur https ://hal.archives-ouvertes.fr et https ://tel.archives-ouvertes.fr .

On pourra consulter avec profit les archives de la Revue Française de Géotechnique (site https ://www.geotechnique-journal.org/) ou du Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (http ://madis-externe.ifsttar.fr).

Le site de la société internationale de mécanique des sols (https ://www.issmge.org/) met à disposition les comptes rendus de nombreuses conférences. Sur le pressiomètre on pourra consulter le site dédié : http ://icp-pressuremeter.com/.

Bien sûr, les sites, dits de réseaux sociaux pour chercheurs et scientifiques, comme par exemple ResearchGate peuvent également fournir des informations pertinentes.

Les normes applicables à la géotechnique sont disponibles de manière payante sur les sites de l'ISO, du CEN ou de l'AFNOR.

Chapitre 1

Identification des sols

1.1 DESCRIPTION D'UN SOL

1.1.1. Un milieu triphasique

Un sol est défini par trois phases : gazeuse, liquide et solide (cf. figure 1.1). À partir des proportions volumiques et pondérales, on définit des paramètres géométriques et hydriques tels que :

- Porosité : $n = \dfrac{V_v}{V}$
- Degré de saturation : $S_r = \dfrac{V_w}{V_v}$
- Indice des vides : $e = \dfrac{V_v}{V_s}$
- Teneur en eau (pondérale) : $w = \dfrac{W_w}{W_s}$
- Indice de compacité : $I_d = \dfrac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

Avec e_{max} indice des vides correspondant au sol dans son état le plus lâche, et e_{min} dans son état le plus dense.

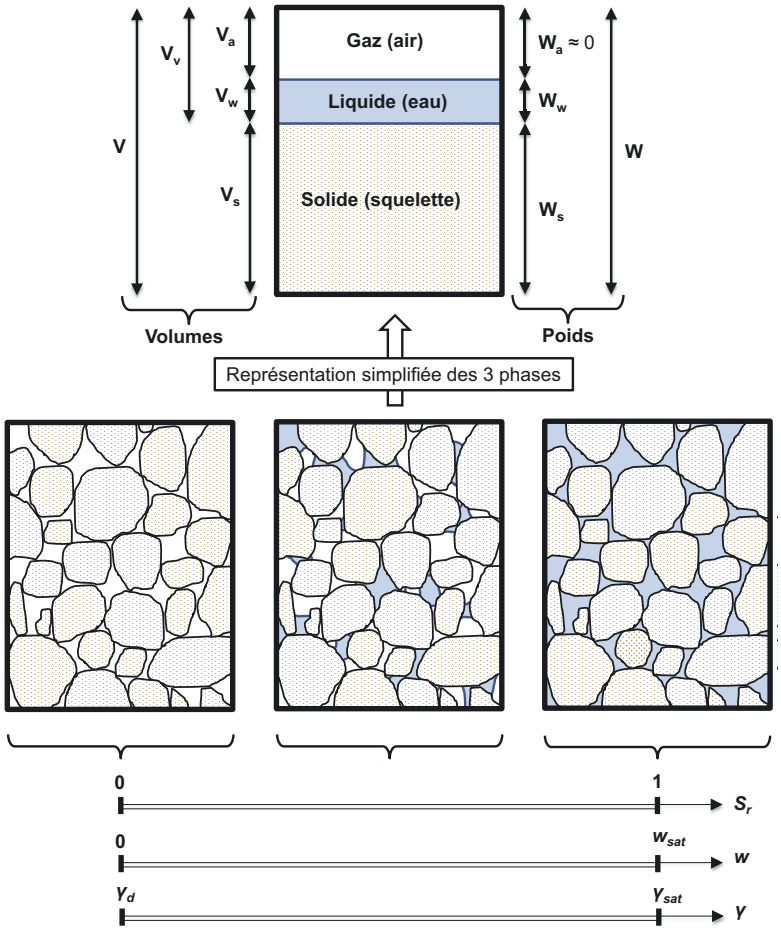


FIGURE 1.1 Description d'un sol - États de saturation

Un sol est caractérisé également par différents poids volumiques :

- apparent : $\gamma = \dfrac{W}{V}$
- du squelette : $\gamma_s = \dfrac{W_s}{V_s}$
- sec : $\gamma_d = \dfrac{W_s}{V}$
- de l'eau : $\gamma_w = \dfrac{W_w}{V_w}$
- déjaugé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

D'après la figure 1.1, le poids volumique apparent γ est égal à γ_d pour un sol sec, à γ_{sat} pour un sol saturé, et à γ_h (pour « humide ») dans les autres cas.

1.1.2. Granulométrie

La distribution dimensionnelle des grains des sols (granularité) peut être appréciée en laboratoire en construisant la courbe granulométrique (cf. figure 1.2).

Cette courbe, utilisée pour les classifications des sols, représente les pourcentages de tamisats cumulés en fonction de l'ouverture des tamis. On appelle **tamisat**, la masse de matériau passant à travers un tamis donné, et **refus** la masse de matériau retenue par ce tamis. La somme des tamisats et des refus cumulés donne toujours la masse total du matériau testé. Pour les sols très fins pour lesquels le tamisage n'est pas possible, la granulométrie est déterminée par sédimentométrie.

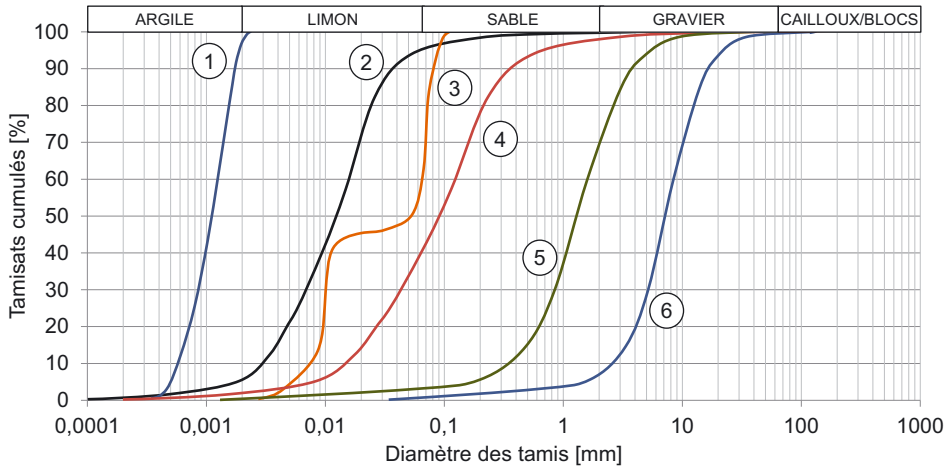


FIGURE 1.2 Courbes granulométriques de six sols différents

Le coefficient d'uniformité (ou de Hazen) C_u et le coefficient de courbure C_c permettent d'apprécier la forme de la courbe granulométrique (cf. figure 1.3) :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}.D_{60}}$$

Avec D_{10}, D_{30} et D_{60}, les diamètres pour lesquels les pourcentages de tamisats cumulés sont respectivement de 10 %, 30 % et 60 %.

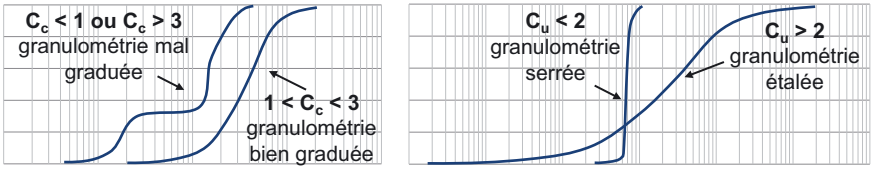


FIGURE 1.3 Interprétation des coefficients C_u et C_c

1.1.3. Plasticité

La consistance d'un sol fin peut être modifiée en faisant varier sa teneur en eau. Par séchage progressif, les argiles et limons passent de l'état liquide à plastique puis à l'état solide. Les limites d'Atterberg de liquidité w_L et de plasticité w_P, déterminées expérimentalement, permettent de séparer ces trois états.

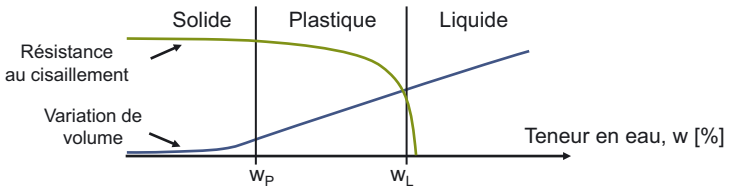


FIGURE 1.4 Limites d'Atterberg

À partir de ces limites, on définit les indices de plasticité I_p et de consistance I_c :

$$I_p = w_L - w_P \qquad I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

1.1.4. Optimum Proctor

L'essai Proctor permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol. Garantir un compactage suffisant permet, entre autres, d'assurer une bonne portance. Le poids volumique sec γ_d correspond au poids de squelette placé dans un certain volume. Il constitue donc un bon indicateur de la compacité.

Les trois paramètres qui contrôlent la variation de poids volumique sec γ_d sont :

- la granulométrie,
- l'énergie de compactage,
- la teneur en eau.

Pour un sol à granularité et à énergie de compactage fixées, le poids volumique sec γ_d atteint une valeur maximale pour une certaine valeur de teneur en eau : l'**optimum Proctor** w_{OP}. Ce paramètre se détermine pour différentes énergies de compactage (cf. figure 1.5).

Les courbes $\gamma_d = f(w)$ sont asymptotiques à la courbe de saturation d'équation (avec $S_r = 1$) :

$$\gamma_d = \frac{S_r.\gamma_s}{S_r + \frac{w.\gamma_s}{\gamma_w}}$$

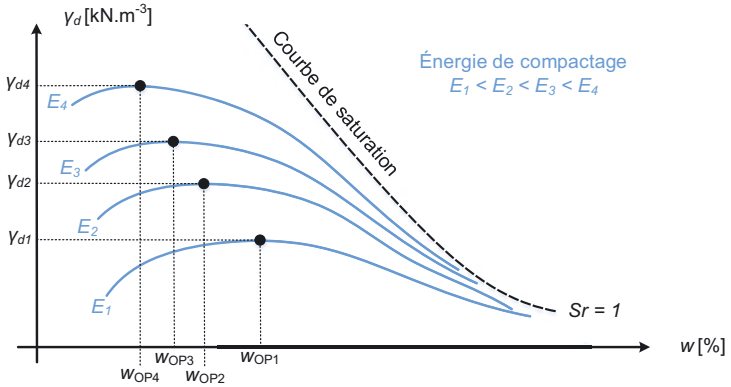


FIGURE 1.5 Diagramme Proctor - $\gamma_d = f(w)$

1.2 CLASSIFICATION DES SOLS

Les principes de classification permettent de regrouper les sols en classes présentant des compositions et des propriétés géotechniques similaires, et en fonction de leur convenance aux usages qui leur sont destinés par l'ingénierie.

Les sols sont classés par groupe en fonction de leur nature, qui correspond à leur composition uniquement, indépendamment de leur teneur en eau ou de leur compacité, en tenant compte de la granularité, de la plasticité, de la teneur en matière organique et de leur origine.

1.2.1. Classification USCS-LCPC [1]

Cette classification se base sur la granulométrie des trois composantes : graviers (Gr), sables (Sa) et fines (cf. tableau 1.1 et figure 1.6). On distingue les sols grenus et fins selon que le pourcentage d'éléments $< 0,08$ mm est inférieur ou supérieur à 50 %. La différenciation en limon et argile est faite à partir des caractéristiques de plasticité. On utilise pour cela le diagramme de Casagrande qui permet de classer la fraction argileuse selon sa sensibilité à l'eau ou sa plasticité.

1. USCS : *Unified Soil Classification System* - LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

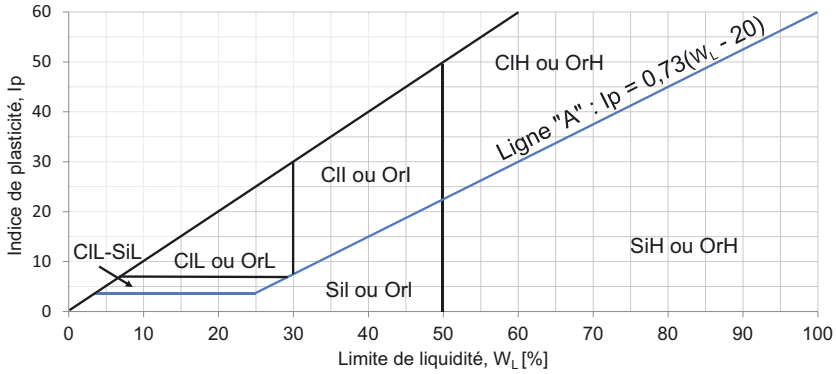


FIGURE 1.6 Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins
Cl : argile, Si : limon, Or : sol organique - L : peu plastique, I : plastique, H : très plastique

Tableau 1.1 Classification des sols grenus

	Fraction > 80 µm	Fraction < 80 µm	Conditions	Désignation	Symboles
GRAVES	Majorité > 2 mm	0 à 5%	Cu > 4 1 < Cc < 3	Grave propre, bien graduée	GrW
			sinon	Grave propre, mal graduée	GrP
		5 à 12%	sous la ligne A	Grave limoneuse	siGr
			sur la ligne A	Grave argileuse	clGr
SABLES	Majorité < 2 mm	0 à 5%	Cu > 6 1 < Cc < 3	Sable propre, bien gradué	SaW
			sinon	Sable propre, mal gradué	SaP
		5 à 12%	sous la ligne A	Sable limoneux	siSa
			sur la ligne A	Sable argileux	clSa

Si la fraction < 80 µm représente plus de 12 % du mélange, on adoptera un double classement clSa/siSa - SiL/SiI/SiH/ClL/ClI/ClH.

1.2.2. Autres classifications

Certains types d'études nécessitent une classification particulière. À titre d'exemple, le **GTR** [2] est un guide de classification des matériaux de remblais et de couches de forme d'infrastructures routières. Les sols sont classifiés en fonction de leur nature (granularité, limites d'Atterberg, valeur au bleu), de leur état (teneur en eau, optimum Proctor), et de leur comportement mécanique (valeurs Los Angeles et Micro Deval).

Une autre classification basée sur les essais en place sera présentée au chapitre 4.

2. GTR : Guide des Travaux Routiers.