

Jean-Pierre Magnan et Nicolai Droniuc

BASES DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

Exercices et problèmes

Presses des Ponts, 2019

Sommaire détaillé

Avant-propos	5
Préambule	7
Symboles et unités	9
Chapitre 1. Identification des sols	11
1.1 Introduction	11
1.2 Les phases du sol	11
1.3 Les particules des sols	22
1.4 Les particules fines et la plasticité des sols	41
1.5 Les classifications des sols	57
1.6 Les paramètres d'état des sols	68
Chapitre 2. Les sols comme milieux continus	77
2.1 Introduction	77
2.2 Généralités sur les contraintes dans les sols	77
2.3 Contraintes initiales dans un massif de sol	84
2.4 Diffusion des charges de surface dans les massifs de sols	92
Chapitre 3. Hydraulique des sols saturés	113
3.1 Introduction	113
3.2 Bases de l'hydraulique des sols saturés	113
3.3 Réseaux d'écoulement et calculs hydrauliques	122
3.4 Essais d'eau sur le terrain	149
Chapitre 4. Propriétés mécaniques des sols	161
4.1 Introduction	161
4.2 Généralités sur le comportement mécanique des sols	161
4.3 Résistance (essais de laboratoire)	162
4.4 Déformabilité (essais de laboratoire)	197
4.5 Résistance (essais en place)	229
4.6 Déformabilité (essais en place)	249
4.7 Toutes propriétés des sols d'un site	256
Chapitre 5. Calculs de stabilité des massifs de sols	265
5.1 Introduction	265
5.2 Portance des sols sous les fondations superficielles	265
5.3 Portance des sols sous les fondations profondes	293
5.4 Stabilité des ouvrages de soutènement (poussée et butée)	321
5.5 Stabilité des remblais et des pentes	371
Chapitre 6. Calculs de déformation des massifs de sols	395
6.1 Introduction	395
6.2 Calculs d'amplitude de tassement (méthode œdométrique)	395
6.3 Calculs d'amplitude de tassement (méthode pressiométrique)	406
6.4 Calculs de consolidation des sols fins (amplitudes et vitesses)	414
Chapitre 7. Propriétés thermiques des sols	429
7.1 Introduction	429
7.2 Propriétés thermiques des sols	430
7.3 Propagation de la chaleur dans les sols	434

Chapitre 8. Problèmes généraux	445
8.1 Introduction	445
8.2 Stabilité d'une excavation urbaine	445
8.3 Étude géotechnique d'un projet de bâtiment	452
8.4 Adaptation des fondations de maisons au site	466
8.5 Résistance au cisaillement, poussée et butée	474
8.6 Stabilité au glissement d'un barrage	482
8.7 Étude d'un barrage en terre	484
8.8 Remblai sur sol compressible	496
8.9 Étude de digues en terre	508
8.10 Élargissement d'un remblai sur pente	526
8.11 Remblai sur sol compressible	535
8.12 Stabilité d'une pente naturelle	543
8.13 Fondations sur pieux	548
8.14 Fondations d'un bâtiment	559
8.15 Stabilisation d'une pente instable	563
8.16 Conception d'un mur ancré	569
8.17 Conception d'un mur de soutènement	576
Annexe - Documents de travail	585

Avant-propos

Les exercices de mécanique des sols sont un outil pour comprendre les notions introduites par les enseignants dans les chapitres successifs des cours et apprendre les raisonnements et outils de base de la caractérisation des sols et des calculs.

Les exercices rassemblés dans cet ouvrage ont été utilisés dans l'enseignement de la mécanique des sols et du calcul des ouvrages géotechniques à l'École Nationale des Ponts et Chaussées et à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État depuis plus de vingt ans. Ils correspondent à l'esprit et au contenu du cours de mécanique des sols et des roches enseigné dans les deux écoles sous la direction de Jean-Pierre Magnan.

Les exercices ont été classés en chapitres, regroupant des exercices élémentaires et d'autres exercices et problèmes plus compliqués, souvent inspirés de situations réelles rencontrées par les auteurs. Il existe deux types d'exercices ou problèmes. Beaucoup font l'objet d'un corrigé détaillé. D'autres sont donnés à la suite et ne comportent que les énoncés et les réponses. Ils sont en général semblables à ceux qui sont corrigés en détail, mais avec d'autres données, pour que l'utilisateur du recueil puisse reproduire sur un autre énoncé la solution qu'il a pu lire pour le premier exercice.

Une attention particulière a été apportée à la qualité des textes, des formules et des figures de chaque sujet et corrigé. Le lecteur voudra bien excuser les auteurs des erreurs qui pourraient subsister dans cet ouvrage.

Jean-Pierre Magnan
Niculai Droniuc

Préambule

Pour découvrir la mécanique des sols et ses applications au génie civil et à la maîtrise des risques naturels, il faut d'abord apprendre que les sols sont formés de particules, de liquides et de gaz, dont on peut caractériser la composition et l'état, puis apprendre à manipuler les contraintes et les déformations qui permettent de former des modèles mécaniques des massifs de sols et des ouvrages. Les propriétés hydrauliques et mécaniques des sols sont alors étudiées, à partir des essais que l'on peut réaliser en laboratoire et sur le terrain, mais aussi de modèles simplifiés qui peuvent être utilisés dans les calculs. Les principes de la mécanique des sols sont appliqués de façon variée dans ces études et les exercices et problèmes proposés offrent la possibilité de les assimiler et d'en maîtriser l'application.

Pour les études d'ouvrages, les géotechniciens disposent d'outils généraux pour calculer les déformations et la résistance des massifs de sols soumis à des sollicitations variées issues de l'analyse des ouvrages courants. Les calculs d'écoulements, de tassements, de pressions limites sous une plaque, autour d'un pieu et sur un écran de soutènement et les calculs de stabilité des ouvrages en terre sont l'objet des exercices et problèmes des derniers chapitres de cet ouvrage.

Symboles et unités

Les symboles couramment utilisés en mécanique des sols ont été harmonisés par la Société Internationale de Mécanique des sols et de Géotechnique (anciennement appelée Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations). Ces symboles sont introduits et utilisés dans les différents chapitres de cet ouvrage.

Les unités sont celles du système international (SI) :

- pour les longueurs, le mètre (m) et ses multiples et fractions ;
- pour les masses, le kilogramme (kg) et ses dérivés, notamment : gramme (g), milligramme (mg). Le mégagramme (Mg) est souvent appelé « tonne » (t), par référence au vocabulaire courant ;
- pour le temps, la seconde (s), mais aussi les unités courantes non décimales de description du temps : minute (min), heure (h), mois (mois), année (an) ;
- pour la température, le degré Celsius (°C).

On utilise aussi les unités dérivées :

- pour les forces, le Newton (N) et ses multiples kilonewton (kN) et méganewton (MN) ;
- pour les pressions et les contraintes, le pascal (Pa), mais surtout ses multiples kilopascal (kPa) et mégapascal (MPa) ;
- pour les énergies, le joule (J) et ses multiples kilojoule (kJ) et mégajoule (MJ).

Pour les angles, on n'utilise pratiquement pas le radian (Rd) mais le degré (degré), sous forme décimale (on ne travaille pas en minutes et secondes d'angle).

Les fonctions usuelles sont aussi notées suivant les conventions internationales :

- les logarithmes népérien (ln) et décimal (lg) ;
- la fonction exponentielle $\exp(x)$ ou e^x ;
- les fonctions trigonométriques sinus (sin), cosinus (cos), tangente (tan), cotangente (cotan) et leurs inverses arc sinus (arcsin), arc cosinus (arccos), arc tangente (arctan) et arc cotangente (arccot).

Chapitre 1. Identification des sols

1.1. Introduction

Les exercices regroupés dans ce chapitre portent sur les sujets suivants :

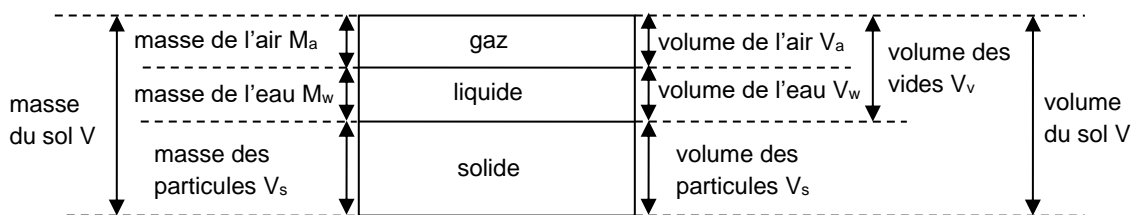
- les phases du sol (particules, eau, gaz) : techniques de quantification, calcul des paramètres du diagramme des phases, relations entre paramètres,
- les particules du sol : mesure des dimensions, courbes granulométriques, mélanges et corrections granulaires ;
- les particules fines et la plasticité des sols : limites de consistance, valeur de bleu,
- la classification des sols (USCS/LCPC, terrassements, autres),
- les paramètres d'état des sols (indice de densité, indices de liquidité et de consistance).

1.2. Les phases du sol

Rappel : les sols contiennent des particules, qui définissent la structure géométrique du sol dans l'espace, mais aussi des composants mobiles, liquides ou gazeux. Les liquides et gaz occupent les vides délimités par les particules, appelés « pores ». L'arrangement des particules, appelé « squelette » du sol, définit le volume que cet ensemble de particules occupe à un instant donné.

Les dimensions des « particules » peuvent varier dans de très larges limites ; de quelques micromètres pour les particules d'argile à quelques décimètres, voire mètres, pour les plus grosses (cailloux et blocs issus de la fracturation des massifs rocheux). On les représente pour cette raison sur une échelle logarithmique décimale (voir section 1.5).

Comme les particules d'un sol peuvent avoir des dimensions variées et être très nombreuses, la mécanique des sols ne les représente pas individuellement, mais les regroupe par « phases » : phase solide (les particules), phase liquide (de l'eau, en général) et phase gazeuse (de l'air et de la vapeur d'eau, en général). C'est l'objet du « diagramme des phases », qui définit globalement les masses et volumes des composants d'un sol et des vides entre particules. Les masses sont définies à gauche du diagramme et les volumes à droite. Les symboles et les noms sont définis par une convention internationale (Société Internationale de mécanique des sols et de géotechnique) et sont souvent d'origine anglaise : *w* pour l'eau - water, par exemple).



Les masses et volumes définis sur ce diagramme permettent de déterminer des paramètres sans dimensions et des paramètres dimensionnels (masses volumiques) :

- paramètres sans dimensions

porosité	$n = V_v / V$
indice des vides	$e = V_v / V_s$
teneur en eau (massique)	$w = M_w / M_s$
teneur en eau volumique	$\theta = V_w / V$
degré de saturation	$S_r = V_w / V_v$
- paramètres dimensionnels

masse volumique	$\rho = M / V$
masse volumique du sol sec	$\rho_d = M_s / V$
masse volumique de l'eau	$\rho_w = M_w / V_w$

masse volumique des particules $\rho_s = M_s/V_s$

masse volumique de l'air $\rho_a = M_a/V_a$

masse volumique déjaugée $\rho = \rho - \rho_w$.

On utilise aussi une série analogue de paramètres dimensionnels appelés poids volumiques et notés γ . Les poids volumiques sont égaux au produit des masses volumiques par l'accélération g de la pesanteur. La valeur de $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ est souvent arrondie à 10 m/s^2 .

On utilise d'autre part une série de paramètres de densité sans dimension, égaux au rapport de la masse volumique (du sol, de l'eau, du sol sec, des particules, de l'air, déjaugée) à la masse volumique de l'eau ρ_w . Ces densités sont notées G ($G, G_d, G_w=1, G_s, G_a, G'$).

Les exercices qui suivent portent sur la façon dont on obtient les quantités définies dans ce diagramme et les paramètres associés.

Exercices et corrections détaillés

1.2.1 Exercice 1

ÉNONCÉ

Deux carottes d'argile ont été prélevées dans un même sondage. À l'arrivée des caisses de carottes au laboratoire, on a prélevé un échantillon d'argile dans chaque caisse et on a effectué les mesures suivantes de masses et de volumes :

	Échantillon 1	Échantillon 2
Masse totale du sol	48 g	68 g
Volume total du sol	30 cm ³	43 cm ³
Masse du sol après étuvage à 105°C	30 g	40 g

Déterminer la teneur en eau des deux échantillons d'argile ? La masse volumique des particules solides est égale à $\rho_s=2,7 \text{ Mg/m}^3$. Combien vaut le degré de saturation S_r de chacun des échantillons ? Quel volume d'eau total est nécessaire pour saturer un mètre cube d'argile dans chaque cas ?

CORRIGÉ

La teneur en eau w est le rapport de la masse de l'eau M_w à la masse des particules M_s . La masse des particules est la masse du sol après étuvage. La masse d'eau est la différence entre la masse initiale du sol et sa masse après étuvage. On obtient donc :

$$\text{Échantillon 1} \quad M_s=30\text{g} \quad M_w=M-M_s=18\text{g} \quad w = M_w/M_s = 0,6$$

$$\text{Échantillon 2} \quad M_s = 40\text{g} \quad M_w = M - M_s = 28\text{g} \quad w = M_w/M_s = 0,7$$

Le degré de saturation S_r est le rapport du volume d'eau V_w au volume des vides V_s . Le volume de l'eau V_w est égal à M_w/ρ_w . Le volume des vides est la différence entre le volume total V et volume des particules V_s . Le volume des particules V_s est égal à M_s/ρ_s . Par conséquent, le degré de saturation vaut :

$$S_r = \frac{M_w / \rho_w}{V - M_s / \rho_s}$$

On obtient pour chacun des sols :

$$S_{r1} = \frac{18/1}{30 - 30/2,7} = \frac{18}{18,89} = 0,953,$$

$$S_{r2} = \frac{28/1}{43 - 40/2,7} = \frac{28}{28,19} = 0,993.$$

Le volume d'eau nécessaire pour saturer le sol est le volume des vides, égal à $V_v = V - M_s/\rho_s$. La masse volumique de l'eau est $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ Mg/m}^3$. Un mètre cube de sol est plus gros que l'échantillon dans le rapport $10^6/V$. La masse d'eau nécessaire pour saturer un mètre cube

d'argile est donc égale à

$$M_w(1\text{m}^3) = \rho_w(V - M_s/\rho_s)10^6/V,$$

soit

$$M_{w1}(1\text{m}^3) = 1 (30 - 30/2,7)10^6/30 \text{ g} = 0,63 \cdot 10^6 \text{ g} = 630 \text{ kg},$$

$$M_{w2}(1\text{m}^3) = 1 (43 - 40/2,7)10^6/43 \text{ g} = 0,656 \cdot 10^6 \text{ g} = 656 \text{ kg}.$$