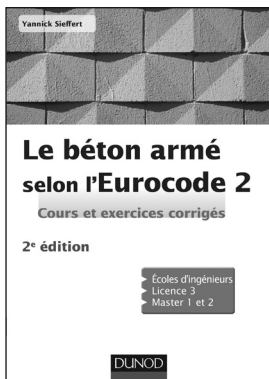


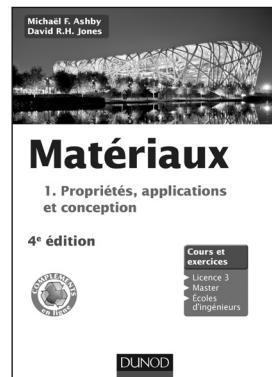
# **Géotechnique**

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)



*Le béton armé selon l'Eurocode 2*  
*Cours et exercices corrigés*  
2<sup>e</sup> édition  
Yannick Sieffert  
320 pages  
Dunod, 2014

*Matériaux*  
*T.1- Propriétés, applications et conception*  
4<sup>e</sup> édition  
Michael F. Ashby, David R. H. Jones  
448 pages  
Dunod, 2013



**Clément Desodt  
Philippe Reiffsteck**

# **Géotechnique**

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

DUNOD

Illustration de couverture : *Road Damaged by Landslide* © Yali Shi - Fotolia

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que présente 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 1<sup>er</sup> 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, 2015

5 rue Laromiguière, 75005 Paris  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-072047-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> 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
<b>EXERCICES</b>	7
<b>SOLUTIONS</b>	12

## CHAPITRE 2 • HYDRAULIQUE DES SOLS

2.1 Écoulements en un milieu granulaire	21
2.2 Hydraulique des puits	24
<b>EXERCICES</b>	30
<b>SOLUTIONS</b>	38

## CHAPITRE 3 • ÉTATS DE CONTRAINTE DANS LES SOLS

3.1 Contraintes totales et effectives	51
3.2 Influence du chargement	56
<b>EXERCICES</b>	58
<b>SOLUTIONS</b>	65

## CHAPITRE 4 • RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

4.1 Élastoplasticité	77
4.2 Essais de laboratoire	83
4.3 Essais <i>in situ</i>	87
<b>EXERCICES</b>	93
<b>SOLUTIONS</b>	101

## CHAPITRE 5 • TASSEMENTS

5.1 Consolidation	117
5.2 Compressibilité	122
<b>EXERCICES</b>	126
<b>SOLUTIONS</b>	133

**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
	<b>EXERCICES</b>	160
	<b>SOLUTIONS</b>	165

**CHAPITRE 7 • PENTE ET TALUS**

7.1	Mouvements de terrains	173
7.2	Calcul de stabilité	174
	<b>EXERCICES</b>	178
	<b>SOLUTIONS</b>	183

**CHAPITRE 8 • FONDATIONS**

8.1	Technologie de fondations	196
8.2	Méthodes de calcul	198
	<b>EXERCICES</b>	215
	<b>SOLUTIONS</b>	225

**ANNEXES**

A.	Distribution de contraintes dans un massif - abaqes	239
B.	Coefficient de consolidation	241
C.	Coefficient de poussée/butée	243

	<b>INDEX</b>	245
--	--------------	-----

# 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. Néanmoins, les exercices ont été traités dans le cadre de l'Eurocode 7 et des normes d'application en vigueur.

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](http://www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100720477)



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

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

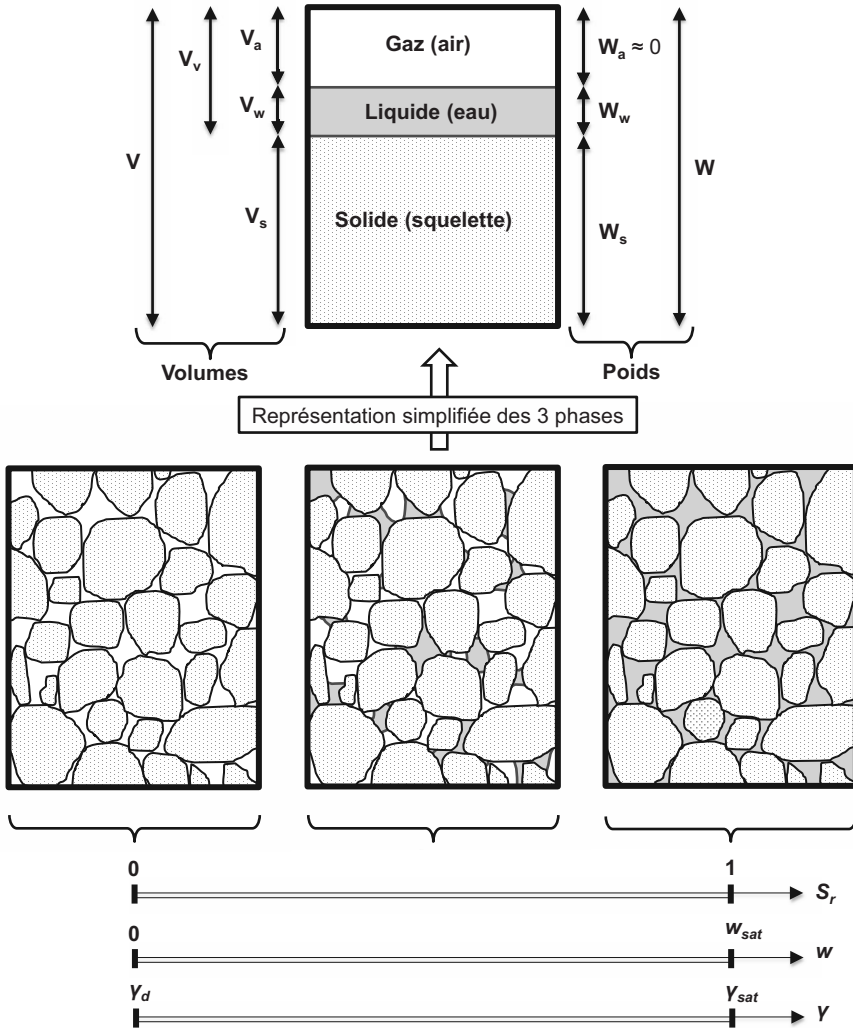


FIGURE 1.1 Description d'un sol - États de saturation

Un sol est caractérisé également par différents poids volumiques :

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

- déjaugé :  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

D'après la figure 1.1, le poids volumique apparent  $\gamma$  est égal à  $\gamma_d$  pour un sol sec, à  $\gamma_{sat}$  pour un sol saturé, et à  $\gamma_h$  (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.

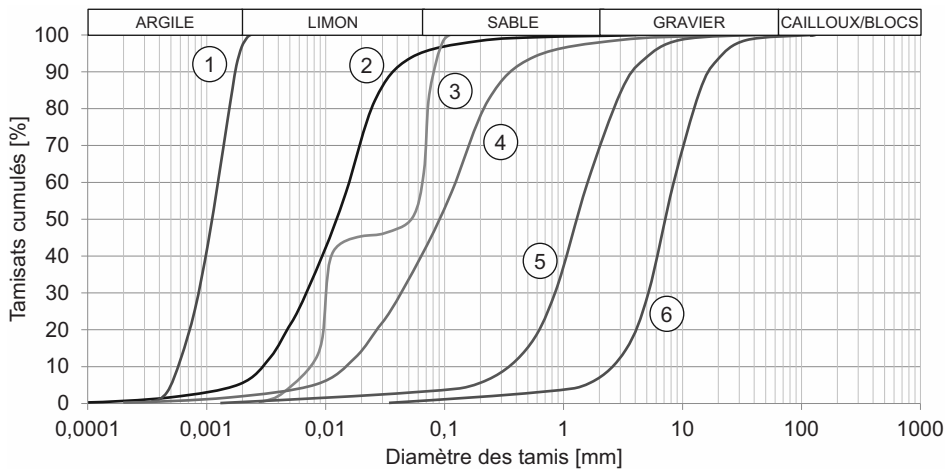


FIGURE 1.2 Courbes granulométriques de six sols différents

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) :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

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

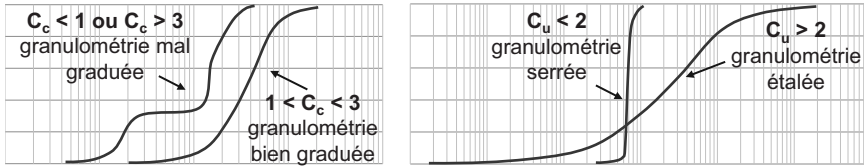


FIGURE 1.3 Interprétation des coefficients  $C_u$  et  $C_c$

### 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.

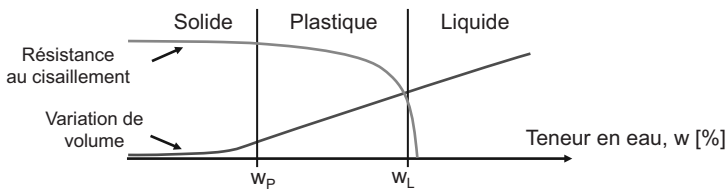


FIGURE 1.4 Limites d'Atterberg

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

$$I_p = w_L - w_P \quad I_c = \frac{w_L - w_P}{I_p}$$

### 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  $\gamma_d$  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  $\gamma_d$  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  $\gamma_d$  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  $S_r = 1$ ) :

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

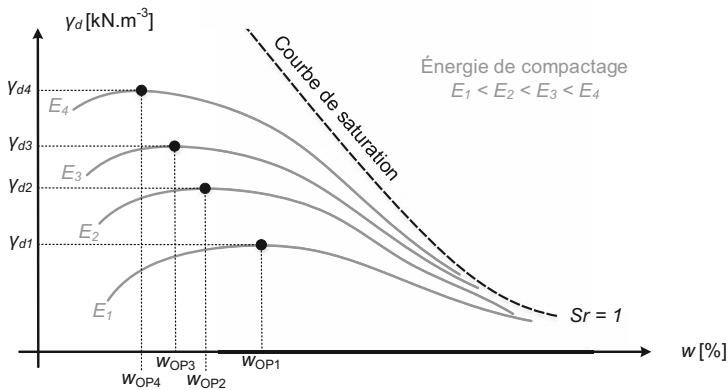


FIGURE 1.5 Diagramme Proctor -  $\gamma_d = f(w)$

## 1.2 CLASSIFICATION DES SOLS

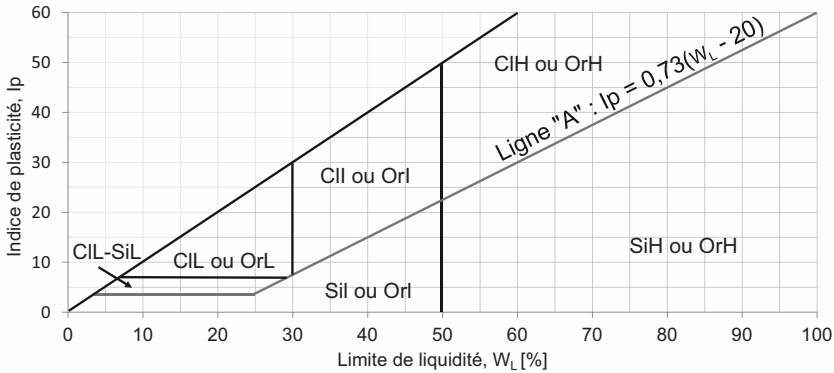
Les principes de classification permettent de regrouper les sols en classes présentant des compositions et des propriétés géotechniques similaires, et en fonction de leur convenance aux usages qui leur sont destinés par l'ingénierie.

Les sols sont classés en groupes de sols 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 <sup>1</sup>

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 $\mu\text{m}$	Fraction < 80 $\mu\text{m}$	Conditions	Désignation	Symboles
<b>GRAVES</b>	Majorité > 2 mm	0 à 5%	$\text{Cu} > 4$ $1 < \text{Cc} < 3$	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	ciGr
<b>SABLES</b>	Majorité < 2 mm	0 à 5%	$\text{Cu} > 6$ $1 < \text{Cc} < 3$	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	ciSa

### 1.2.2. Autres classifications

Certains types d'études nécessitent une classification particulière. À titre d'exemple, le **GTR**<sup>2</sup> 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.

## EXERCICES

Pour l'ensemble des exercices suivants, le poids volumique de l'eau est considéré connu :  $\gamma_w = 10 \text{ kN.m}^{-3}$ .

---

### Exercice 1.1. ★

*Solution p. 12*

Démontrer les relations suivantes :

$$(1) e = \frac{n}{1-n} \quad (2) \gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (3) S_r = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e} \quad (4) w_{sat} = \frac{n \cdot \gamma_w}{\gamma_{sat} - n \cdot \gamma_w}$$

---

### Exercice 1.2. ★

*Solution p. 12*

(1) Trouver la relation reliant le poids volumique saturé  $\gamma_{sat}$  avec les poids volumiques  $\gamma_d$ ,  $\gamma_w$  et  $\gamma_s$ .

---

### Exercice 1.3. ★★

*Solution p. 12*

Un limon saturé est caractérisé par un poids volumique saturé  $\gamma_{sat}$  et une teneur en eau  $w_{sat}$ .

(1) Déterminer l'expression littérale de l'indice des vides  $e$ , de la porosité  $n$  et du poids volumique du squelette  $\gamma_s$  en fonction des paramètres connus.

(2) En considérant  $1 \text{ m}^3$  de limon, déterminer les expressions des volumes respectifs d'air  $V_a$ , d'eau  $V_w$  et de solide  $V_s$ .

---

### Exercice 1.4. ★★

*Solution p. 13*

(1) En sachant que  $\gamma_d = 17,7 \text{ kN.m}^{-3}$ ,  $w = 4 \%$ ,  $\gamma_s = 26,5 \text{ kN.m}^{-3}$ , déterminer le poids d'eau à ajouter à  $1 \text{ m}^3$  de sol afin d'atteindre 95 % de degré de saturation.

---

### Exercice 1.5. ★★

*Solution p. 13*

Un échantillon de sol a un poids volumique apparent  $\gamma_1 = 16,9 \text{ kN.m}^{-3}$  et de  $\gamma_2 = 17,9 \text{ kN.m}^{-3}$  pour des degrés de saturation respectifs de  $S_{r,1} = 50 \%$  et  $S_{r,2} = 72 \%$ .

(1) Déterminer l'indice des vides  $e$  et le poids volumique spécifique  $\gamma_s$ .

---

### Exercice 1.6. ★★

*Solution p. 14*

Deux échantillons de sable fin ont été prélevés, l'un sous le niveau de la nappe phréatique (Échantillon 1), l'autre au-dessus (Échantillon 2). Le tableau 1.2 présente les mesures effectuées.

(1) Dédurre pour chaque échantillon le poids volumique apparent  $\gamma$ , le poids volumique sec  $\gamma_d$  et la teneur en eau  $w$ .

Tableau 1.2 Mesures des poids et de volume sur sable fin

		Échantillon 1	Échantillon 2
W	N	2,5	2,3
V	cm <sup>3</sup>	130	105
W <sub>s</sub>	N	2,2	1,9

Un essai au pycnomètre a été réalisé afin de déterminer le poids volumique des particules solides  $\gamma_s$  (voir figure 1.7). On suppose que ce poids volumique est le même pour l'ensemble de la couche de sable fin. Les masses mesurées sont :  $M_1 = 1200,1$  g,  $M_2 = 55,1$  g et  $M_3 = 1234,9$  g.

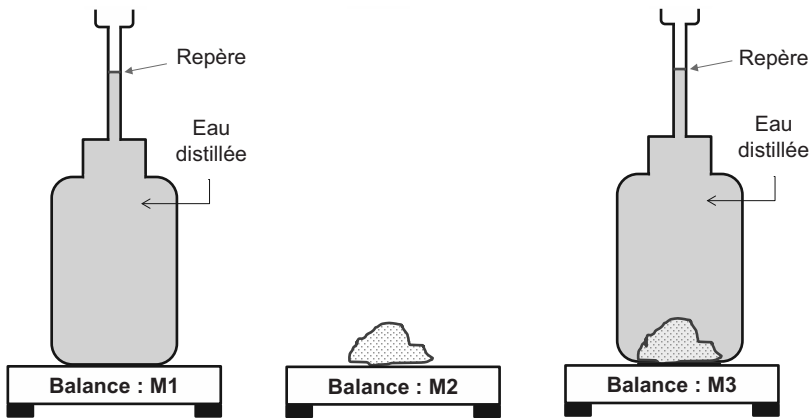


FIGURE 1.7 Pesées au pycnomètre

$M_1$  : masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère.  $M_2$  : masse du matériau sec.

$M_3$  : masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère et le matériau sec

- (2) Exprimer la masse volumique des particules solides  $\rho_s$  en fonction de  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  et  $\rho_w$ .
- (3) Déterminer  $\gamma_s$  et en déduire l'indice des vides  $e$  et le degré de saturation  $S_r$  des échantillons 1 et 2.

### Exercice 1.7. ★★★

*Solution p. 14*

Soit un matériau granulaire sableux, initialement d'indice des vides  $e = 0,8$ . On définit par  $p_L$  le pourcentage de limon sec correspondant au poids des grains secs de limon par rapport au poids total de grains secs. Puis on définit par  $p_S$  le pourcentage de matériau sableux sec. Les deux matériaux ont un poids volumique spécifique  $\gamma_s = 26,5$  kN.m<sup>-3</sup>.

- (1) Déterminer le pourcentage  $p_L$  à rajouter dans le matériau sableux afin d'obtenir un matériau saturé avec une teneur en eau  $w = 16$  %.



**Exercice 1.8. ★**

Solution p. 15

Diamètre	mm	0,008	0,016	0,031	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Sol A	g	1	3	29	210	390	750	269	82	62	2
Sol B	g	40	250	753	762	320	20	4	1	0	0

FIGURE 1.8 Pesées de refus partiels

- (1) Tracer les courbes granulométriques des sols A et B à partir des pesées en figure 1.8.

**Exercice 1.9. ★**

Solution p. 16

Les courbes granulométriques de quatre sols non organiques sont tracées en figure 1.9. Les valeurs des limites d'Atterberg sont indiquées dans le tableau 1.3.

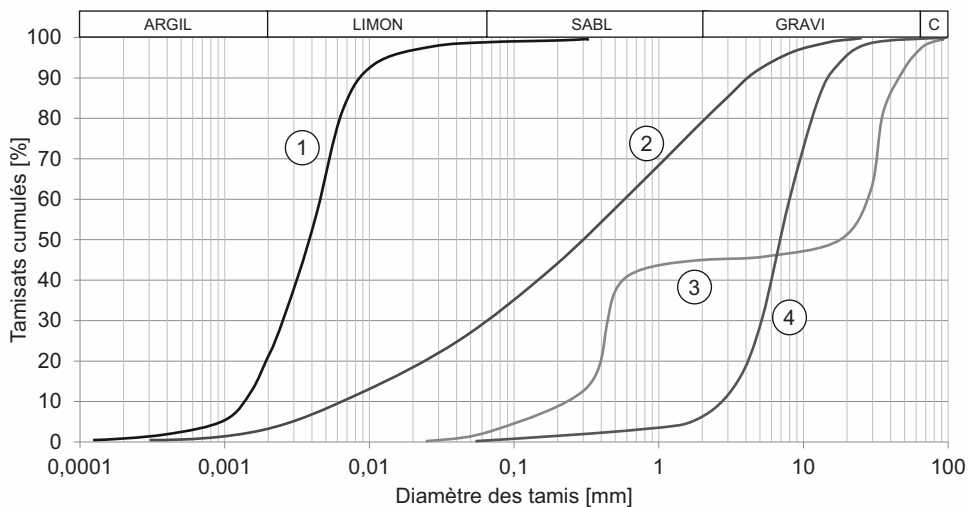


FIGURE 1.9 Courbes granulométriques de quatre sols différents

Tableau 1.3 Limites d'Atterberg des quatre sols

		Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
$w_L$	%	90	45	65	-
$w_P$	%	35	15	20	-

- (1) Pour chaque sol, déterminer les pourcentages de cailloux  $C$ , gravier  $G$ , sable  $S$ , limon  $L$ , et argile  $A$ .

- (2) Déterminer les coefficients d'uniformité  $C_u$  et de courbure  $C_c$ . Commenter.
- (3) Classer les quatre sols selon la classification USCS-LCPC.

**Exercice 1.10. ★★**

*Solution p. 17*

Un chantier de route présente une zone où le sol *A* est instable et à granulométrie serrée (cf. courbe granulométrique en figure 1.10). Au lieu de remplacer le sol, ce dernier est mélangé avec un second sol *B*, plus grossier et à granulométrie plus étendue.

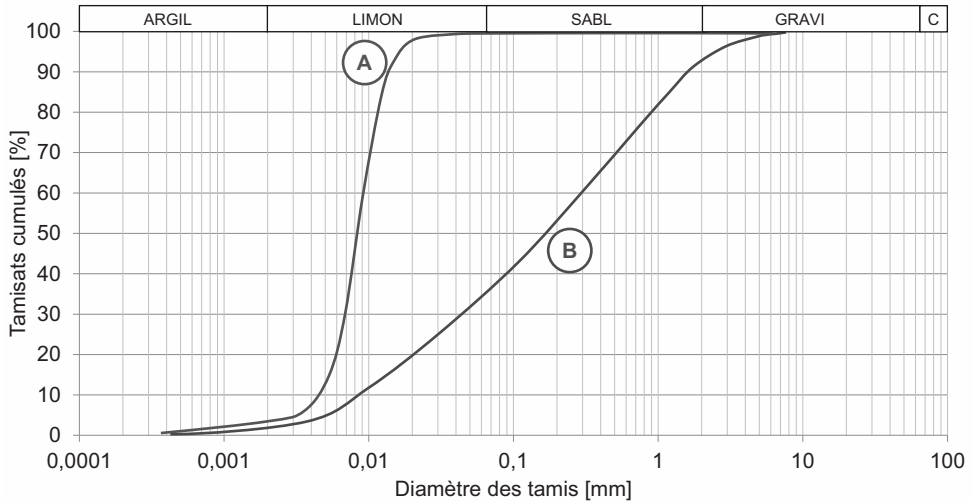


FIGURE 1.10 Courbes granulométriques des sols A et B

- (1) Tracer les solutions correspondant aux pourcentages relatifs  $A/B$  de 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30.
- (2) Déterminer les pourcentages relatifs  $A/B$  respectant  $C_u > 10$ .

**Exercice 1.11. ★**

*Solution p. 18*

- (1) Montrer que l'indice de compacité  $I_d$  peut également s'exprimer par les poids volumiques secs selon la relation :

$$I_d = \frac{\gamma_{d,max} \cdot (\gamma_d - \gamma_{d,min})}{\gamma_d \cdot (\gamma_{d,max} - \gamma_{d,min})}$$

**Exercice 1.12. ★★***Solution p. 18*

Les côtes de Paimpol en Bretagne possèdent deux types de sable, un siliceux avec  $\gamma_{s,1} = 27,1 \text{ kN.m}^{-3}$ ,  $e_{max,1} = 0,99$ ,  $e_{min,1} = 0,52$ , et un coquillier (calcaire) avec  $\gamma_{s,2} = 23,5 \text{ kN.m}^{-3}$ ,  $e_{max,2} = 0,88$  et  $e_{min,2} = 0,61$ . Les indices des vides  $e_1$  et  $e_2$  sont déterminés au moyen d'un moule avec un diamètre de 10 cm et une hauteur de 10 cm. Les poids secs des sables sont respectivement de  $W_{s,1} = 12,1 \text{ N}$  et  $W_{s,2} = 10,5 \text{ N}$ .

- (1) Déterminer les indices des vides  $e_1$  et  $e_2$ .
- (2) Déterminer les indices de compacité  $I_{d,1}$  et  $I_{d,2}$  ainsi que les poids volumiques secs  $\gamma_{d,1}$  et  $\gamma_{d,2}$ . Commenter.

**Exercice 1.13. ★★***Solution p. 18*

Les résultats d'un essai Proctor sur un sol ( $\gamma_s = 27,2 \text{ kN.m}^{-3}$ ) sont présentés dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4** Essai Proctor - Poids volumiques apparents et teneurs en eau

$w$ [%]	2,7	5,5	8,3	10,2	12,0	13,4	14,5	18,3
$\gamma$ [ $\text{kN.m}^{-3}$ ]	18,0	18,8	20,0	20,6	20,8	20,7	20,4	19,6

- (1) Déterminer le poids volumique sec  $\gamma_d$  pour chaque mesure.
- (2) Tracer la courbe Proctor  $\gamma_d = f(w)$  et déterminer l'optimum Proctor  $w_{opt}$ . Expliquer pourquoi le maximum de compacité correspond au maximum de poids volumique sec et non humide.
- (3) Quelles valeurs de poids volumiques et de teneurs en eau correspondent à 95 % de la compacité relative ?
- (4) Trouver une relation reliant  $\gamma_d$  avec  $S_r$ ,  $\gamma_w$ ,  $w$  et  $\gamma_s$ .
- (5) Tracer les courbes  $\gamma_d = f(w)$  à partir de la relation précédemment déterminée, pour des degrés de saturation de  $S_r = [1 ; 0,9 ; 0,8 ; 0,7 ; 0,6]$ .

## SOLUTIONS DES EXERCICES

### Solution 1.1.

$$(1) e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v \cdot V}{V_s \cdot V} = \frac{n \cdot V}{V_s} = \frac{n \cdot V}{V - V_v} = \frac{n}{1 - n}$$

$$(2) \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s \cdot W}{V \cdot W} = \gamma \cdot \frac{W_s}{W} = \gamma \cdot \frac{W_s}{W_s + W_w} = \frac{\gamma}{1 + w}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s \cdot V_s}{V \cdot V_s} = \gamma_s \cdot \frac{V_s}{V} = \gamma_s \cdot \frac{V_s}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

$$(3) S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w \cdot W_w}{V_v \cdot W_w} = \frac{W_w}{\gamma_w \cdot V_v} = \frac{W_w \cdot W_s}{\gamma_w \cdot V_v \cdot W_s} = \frac{w \cdot W_s}{\gamma_w \cdot V_v} = \frac{w \cdot W_s \cdot V_s}{\gamma_w \cdot V_v \cdot V_s} = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e}$$

$$(4) w_{sat} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\frac{W_w}{V_w}}{\frac{W - W_w}{V_w}} = \frac{\gamma_w}{\frac{V \cdot W}{V \cdot V_w} - \gamma_w} = \frac{n \cdot \gamma_w}{\gamma_{sat} - n \cdot \gamma_w}$$

### Solution 1.2.

$$(1) \gamma_{sat} = \frac{W}{V} \quad \text{avec } S_r = 1 \text{ ou encore } V_v = V_w$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{W_w \cdot V_w}{V \cdot V_w} + \gamma_d = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) + \gamma_d = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{V_s \cdot W_s}{V \cdot W_s}\right) + \gamma_d$$

$$\text{Ainsi : } \gamma_{sat} = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right) + \gamma_d$$

### Solution 1.3.

(1) À partir du poids volumique apparent (ici saturé) et de la teneur en eau, on peut déterminer le poids volumique sec par la relation :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} = \frac{\gamma_{sat}}{1 + w_{sat}}$$

Partons des deux relations suivantes (démontrées précédemment) :

$$S_r = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e} = \frac{w_{sat} \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e} = 1 \quad \text{car limon saturé et } \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

$$\text{On peut ainsi exprimer l'indice des vides : } e = \frac{w_{sat}}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - 1}$$

$$\text{Puis le poids volumique du squelette : } \gamma_s = \gamma_d(1 + e)$$

La porosité se déduit ensuite de l'indice des vides :

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + \frac{V_s}{V_s}} = \frac{e}{1 + e}$$