



MÉCANIQUE DES SOLS

Daniel CORDARY



LONDRES



NEW YORK

PARIS

11, rue Lavoisier
F 75384 Paris Cedex 08

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	V
Table des matières	VII
Avertissement	XV
Chapitre 1 : Définition et constitution d'un sol	1
1.1 Constitution d'un sol	3
a) Le gaz	3
b) L'eau	3
c) Le squelette solide	4
d) Sols grenus et sols fins	4
1.2 Caractéristiques physiques ne dépendant que de la répartition entre elles des trois phases du sol	7
a) Volumes et poids	7
b) Poids volumiques	8
1.3 Caractéristiques physiques dépendant de l'arrangement et de la nature des grains solides	11
1.31 Granulométrie	11
a) Tamisage	11
b) Sédimentométrie	12
c) Caractéristiques granulométriques	13
1.32 Essais propres aux sols grenus	16
a) L'essai d'équivalent de sable	16
b) Densité relative	17
1.33 Essais propres aux sols cohérents	19
a) Généralités	19
b) Limites d'Atterberg	20
c) Analyse minéralogique	21
d) Teneur en matières organiques	21
e) Teneur en CO ₃ Ca	22
1.34 Classification des sols	22
a) Classification des sols fins	22
b) Classification des sols grenus	22
1.4 Le compactage	27
1.41 Les paramètres du compactage	27
1.42 L'essai Proctor	29
1.43 L'essai C.B.R.	31
1.44 Conclusion	31

Chapitre 2 : Mécanique des milieux biphasiques	33
2.1 Rappel de mécanique des milieux continus	35
2.11 Contraintes – déformations	35
a) Notion de contrainte	35
b) Cercle de Mohr	41
c) Notion de déformation	46
2.12 Equations d'équilibre	50
2.13 Loi de comportement	51
Annexe 2.1, 1 : Equilibre en coordonnées polaires dans un plan principal	53
Annexe 2.1, 2 : Déformations en coordonnées polaires	55
2.2 L'eau dans le sol	57
2.20 Définition du sol en tant que domaine d'écoulement	57
a) Porosité	57
b) Vitesse fictive	58
2.21 Formule de Darcy	58
a) Retour sur la notion de charge hydraulique	58
b) Formule de Darcy	60
c) Mesure de la perméabilité	63
α) Perméamètre à charge constante	63
β) Perméamètre à charge variable	64
d) Remarque sur le gradient	64
2.22 Equations générales de l'écoulement	65
a) Equation de continuité	65
b) Equation de mouvement	66
2.23 Etude de quelques écoulements permanents	67
a) Ecoulement monodirectionnel vertical	67
b) Ecoulements plans	67
α) Etude des solutions	67
β) Conditions aux limites	69
γ) Analogie électrique	71
c) Conséquences de l'écoulement sur la stabilité d'ouvrages : radiers et écrans	72
Annexe 2.2, 1 : Loi des filtres	74
2.3 Conditions d'assimilation d'un sol à un milieu continu	77
2.4 Le sol est un milieu polyphasique	79
2.41 Drainage : état drainé, état non drainé	79
2.42 Contrainte totale	81
2.43 Discussion et introduction de la notion de contrainte effective	82
a) Approche fondée sur la distinction entre "contraintes sèches" et "contraintes humides" ..	82

	b) Contrainte effective	86
	α) Sol sec	86
	β) Sol saturé sans écoulement d'eau	86
	γ) Sol saturé avec écoulement d'eau	88
2.5	Etude du champ géostatique	91
2.51	Sol sans écoulement	91
	a) Sol horizontal	91
	b) Sol en pente	92
	c) Rôle de l'eau	93
2.52	Sol avec écoulement	94
	a) Sol horizontal avec écoulement vertical	95
	b) Sol en pente	96
2.53	Rôle du temps	98
2.54	Conclusion - Définition du coefficient K_0	99
Chapitre 3 : Utilisation de lois simples dans le but de décrire le comportement des sols		101
3.1	Etude élémentaire du comportement des sols à partir d'observations	103
	3.11 Essai triaxial	103
	3.12 Essai œdométrique	111
3.2	Elasticité	117
	3.21 Généralités, linéarité, superposition, isotropie, anisotropie, solutions	117
	a) Généralités	117
	b) Isotropie - anisotropie	119
	c) Méthodes de résolution	121
	3.22 Résultats classiques : application à la mécanique des sols	122
	a) Milieu semi-infini	122
	b) Contraintes totales et contraintes effectives	133
	c) Application pratique à la mécanique des sols ..	133
	3.23 Pression interstitielle dans un essai non drainé; formule de Skempton	136
	3.24 Application : initiation aux calculs de tassement	145
	a) Méthode œdométrique	146
	b) Méthode triaxiale	146
	c) Approximations de ces méthodes	148
	3.25 Etude de la consolidation des sols saturés	148
	3.250 Généralités	148
	3.251 Consolidation monodimensionnelle	149
	a) Equations	149
	b) Solutions	154
	c) Consolidation monodimensionnelle d'un multicouche	159
	3.252 Consolidation tridimensionnelle	161
	a) Equations	161
	b) Commentaires - résultats	166

3.253	Remarques diverses	167
a)	Rôle de la vitesse de chargement	167
b)	Rôle de la variation de différents paramètres ..	167
Annexe 3.2, 1 : Consolidation d'un sol composé de plusieurs couches ..		169
3.3	Plasticité	171
3.31	Critères de plasticité	171
3.310	Généralités	171
3.311	Critère de Von Misès	172
3.312	Critère de Tresca	172
3.313	Critère de Coulomb	173
3.314	Application aux sols	175
a)	Les sols vérifient-ils le critère de Coulomb? ...	175
b)	Contraintes effectives et contraintes totales	177
3.315	Méthodes de résolution	178
3.32	Superposition d'équilibres limites	179
3.33	Théorème des états correspondants	182
3.34	Equilibre limite d'un milieu semi-infini	184
3.341	Facettes de glissement	184
3.342	Equilibre limite d'un milieu semi-infini sans cohésion	185
a)	Sol pesant non surchargé	185
b)	Sol non pesant chargé en surface	192
c)	Remarque sur la superposition des charges	195
3.343	Equilibre limite d'un milieu semi-infini doué de cohésion	196
a)	Sol non pesant surchargé	196
b)	Sol pesant sans surcharge	196
c)	Sol pesant surchargé	201
3.344	Equilibre limite d'un milieu purement cohérent ...	201
3.35	Notion de poussée - butée	202
3.351	Déformation dans un milieu en équilibre limite	202
3.352	Etat actif, état passif	203
3.353	Applications	203
a)	Exemple du massif dans lequel règne l'équilibre de Rankine	203
b)	Exemple de l'essai triaxial de révolution	204
3.36	Equilibre de dièdre	205
3.361	Position du problème	205
3.362	Etude d'un cas particulier	206
a)	Schéma avec ligne de discontinuité	206
b)	Schéma avec saut de Prandtl	208
3.363	Application à l'étude des fondations	213
a)	Etude d'un cas particulier (sol horizontal, homogène, charge normale centrée)	213
b)	Fondation soumise à une charge inclinée et excentrée	216
3.364	Conclusion	223

Annexe 3.3, 1 :	Invariants du tenseur des contraintes	229
Annexe 3.3, 2 :	Vitesse de déformation volumique pour divers critères dans le cas des matériaux standard	232
Annexe 3.3, 3 :	Construction géométrique des cercles de Mohr limites	234
Annexe 3.3, 4 :	Relations dans les cercles de Mohr à l'équilibre limite	236
Chapitre 4 :	Détermination des paramètres mécaniques des sols à partir des essais classiques	239
4.1	Domaine des petites déformations	241
4.11	Essai œdométrique	241
4.111	Sols grenus ou pulvérulents	241
4.112	Sols fins	244
	a) Consolidation in situ et consolidation à l'œdomètre	244
	b) Détermination des tassements à partir d'une courbe œdométrique	246
	c) Détermination des caractéristiques mécaniques	247
4.12	Essai triaxial	249
4.121	Conditions initiales	249
	a) Conditions in situ	249
	b) Prélèvement	249
	c) Reconsolidation dans la cellule triaxiale	250
4.122	Sols pulvérulents (sollicitations monotones)	253
	a) Chemin isotrope	253
	b) Chemin "triaxial" classique	254
4.123	Sols fins (sollicitations monotones)	255
	a) Chemin isotrope	255
	α) Essai non drainé	255
	β) Essai drainé	255
	b) Chemin "triaxial" classique	256
	α) Essai consolidé-drainé (C.D.)	256
	β) Essai consolidé-non drainé (C.U.)	256
4.124	Sollicitations cycliques (sols fins et pulvérulents)	258
4.13	Essai pressiométrique	261
4.2	Domaine des grandes déformations et de la rupture	269
4.21	Différents modes de représentation	269
4.22	Essai triaxial	274
4.221	Matériaux pulvérulents	274
	a) Généralités	274
	b) Essais monotones sur matériaux secs	274
	α) Relation contraintes-déformations	274
	β) Etude de la variation de volume; état caractéristique	280

c)	Essais monotones non drainés sur matériaux saturés	288
α)	Principaux résultats	288
β)	Liquéfaction statique	290
d)	Essais cycliques	291
α)	Essais drainés	291
β)	Essais non drainés; liquéfaction	293
4.222	Matériaux cohérents (argiles)	295
a)	Généralités	295
b)	Essai consolidé-drainé (C.D.)	296
α)	Sol normalement consolidé	297
β)	Sol surconsolidé	298
γ)	Cas de la consolidation anisotrope	300
δ)	Conclusion sur l'essai C.D.	301
c)	Essai non consolidé-non drainé (U.U.)	302
α)	Sols saturés	302
β)	Sols non saturés	304
γ)	Compression simple	304
d)	Essai consolidé-non drainé (C.U.)	305
α)	Sol normalement consolidé	305
β)	Sol surconsolidé	311
γ)	Comparaison entre l'essai C.D. et l'essai C.U. pour la détermination de la courbe intrinsèque	315
δ)	Relations entre diverses grandeurs	321
ϵ)	Consolidation in situ et consolidation en laboratoire. Variation de la cohésion avec la profondeur	327
φ)	Conclusion	329
e)	Représentation des états limites dans l'espace (p' , q , e)	329
f)	Essais cycliques	333
g)	Conclusions	334
4.23	Essai à la boîte de cisaillement et autres essais de laboratoire	334
4.231	Principe de l'essai de cisaillement	334
4.232	Matériaux pulvérulents	337
4.233	Matériaux fins	337
a)	Essai consolidé-drainé (C.D.)	337
b)	Essai non consolidé-non drainé (U.U.)	338
c)	Essai consolidé-non drainé (C.U.)	338
4.234	Autres types d'essais de cisaillement	339
a)	Cisaillement simple	339
b)	Boîte de cisaillement annulaire	340
c)	Scissomètre de laboratoire	340
d)	Cylindre creux	441
e)	Appareil biaxial	343
f)	Véritable appareil triaxial	344
4.24	Essais in situ	345
4.241	Essai scissométrique (vane test)	345

4.242	Essai pressiométrique	346
a)	Détermination de la "courbe de cisaillement du sol"	346
b)	Etude d'un cas particulier	349
c)	Conclusion	350
4.243	Essai pénétrométrique	351
4.244	Conclusion sur les essais in situ	351
Annexe 4, 1 :	Simulation en mécanique des sols	352
Annexe 4, 2 :	La compression secondaire des argiles	356
Liste des principales notations		361
Bibliographie		369
Biographies sommaires		375