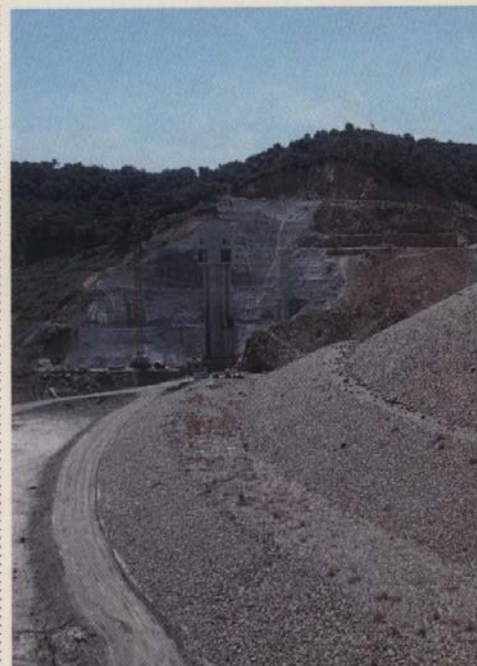


Gérard Philipponnat  
Bertrand Hubert

# FONDATIIONS ET OUVRAGES EN TERRE

**Préface d'André Isnard**

**EYROLLES**



# Sommaire

## PREMIÈRE PARTIE — LES SOLS

<b>CHAPITRE 1. LES SOLS ET LA GÉOLOGIE</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	3
<b>2. MINÉRALOGIE</b>	4
2.1. Définition	4
2.2. Silicates	4
2.3. Minéraux non silicatés	6
<b>3. PÉTROLOGIE</b>	6
3.1. Les roches magmatiques	6
3.1.1. Généralités	6
3.1.2. Classification	7
3.1.3. Structure des roches magmatiques	7
3.2. Les roches sédimentaires	8
3.2.1. Généralités	8
3.2.2. Formation des roches sédimentaires	8
3.2.3. Classification	11
3.2.4. Stratigraphie	13
3.3. Les roches métamorphiques	14
3.3.1. Généralités	14
3.3.2. Classification	14
<b>4. LES HÉTÉROGÉNÉITÉS GÉOLOGIQUES</b>	15
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	17
<b>CHAPITRE 2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS</b>	<b>19</b>
<b>1. DÉFINITION DES SOLS - NOTATIONS</b>	19
<b>2. STRUCTURE DES SOLS</b>	19

## FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

2.1. Classification des grains solides.....	19
2.2. Structure et eau interstitielle .....	20
2.2.1. Structure des sols pulvérulents .....	20
2.2.2. Structure des argiles.....	21
2.3. Principales familles d'argile.....	23
<b>3. CLASSIFICATION GÉOTECHNIQUE DES SOLS .....</b>	<b>24</b>
3.1. Analyse granulométrique .....	24
3.2. Limites d'Atterberg - Activité des argiles .....	26
3.3. Valeur au bleu .....	28
3.4. Équivalent de sable .....	28
3.5. Teneur en matières organiques.....	28
3.6. Classification des sols .....	28
<b>4. CARACTÉRISTIQUES PONDÉRALES DES SOLS .....</b>	<b>30</b>
4.1. État remanié et état non remanié. Représentation pondérale d'un sol.....	30
4.2. Principales caractéristiques des sols .....	32
4.3. Relations entre les paramètres pondéraux .....	33
<b>EXERCICE .....</b>	<b>35</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>35</b>

## CHAPITRE 3. PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS

Différents états de l'eau dans les sols.....	37
<b>1. PROPRIÉTÉS DE L'EAU LIBRE .....</b>	<b>38</b>
1.2. Écoulement linéaire - loi de Darcy .....	38
1.2. Mesure en laboratoire du coefficient de perméabilité.....	40
1.2.1. Conditions d'essai.....	40
1.2.2. Perméamètre à charge constante.....	40
1.2.3. Perméamètre à charge variable.....	41
1.3. Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité des sols .....	42
1.4. Sols lités - Définition de $k_h$ de $k_v$ .....	43
<b>2. ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS .....</b>	<b>44</b>
2.1. Nappes souterraines.....	44
2.2. Écoulements permanents à deux dimensions en milieu homogène et isotrope.....	45
2.2.1. Réseau d'écoulement .....	45
2.2.2. Calcul du débit à travers un massif de terre .....	47
2.2.3. Conditions aux limites en régime permanent.....	48

2.3. Exemple de traitement informatique avec le code PLAXIS.....	48
2.4. Force d'écoulement.....	51
<b>3. L'EAU CAPILLAIRE .....</b>	<b>53</b>
3.1. Définition de l'eau capillaire.....	53
3.2. Capillarité de l'eau - Loi de Jurin.....	54
3.3. Tube de section variable.....	55
3.4. Porométrie.....	56
3.5. Notion de succion - ascension capillaire.....	56
3.6. Généralisation - Relation succion/teneur en eau.....	57
3.7. Profil hydrique.....	58
<b>4. RÉSULTATS PRATIQUES. Formules d'écoulement en régime permanent .....</b>	<b>60</b>
4.1. Généralités.....	60
4.2. Essai de pompage - Formule de Dupuit.....	60
4.3. Essai Lefranc.....	62
4.4. Essai Lugeon.....	63
4.5. Écran vertical dans une couche perméable.....	63
4.5.1. Solution analytique pour un écran vertical sans fouille.....	63
4.5.2. Écran vertical avec ou sans fouille dans une couche perméable d'épaisseur limitée.....	64
4.6. Batardeaux avec ou sans fouille de longueur infinie.....	65
4.6.1. Définition des batardeaux larges et étroits.....	65
4.6.2. Batardeaux larges avec ou sans fouille.....	66
4.6.3. Batardeaux étroits sans fouille.....	66
4.6.4. Batardeaux étroits avec fouille.....	67
4.7. Batardeaux avec ou sans fouille de longueur finie.....	67
4.7.1. Batardeaux carrés ou circulaires.....	67
4.7.2. Fouille de longueur finie à la surface d'une couche perméable épaisse.....	69
4.8. Drainage et rabattement.....	69
<b>EXERCICES.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>71</b>
<b>CHAPITRE 4. THÉORIE DE LA CONSOLIDATION.....</b>	<b>73</b>
<b>1. DÉFINITION DES CONTRAINTES DANS UN SOL .....</b>	<b>73</b>
<b>2. SOLS SATURÉS .....</b>	<b>74</b>
2.1. Contraintes normales.....	74
2.2. Contrainte tangentielle.....	75

## FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

<b>3. ÉTUDE QUALITATIVE DE LA CONSOLIDATION</b> .....	76
<b>3.1. Remarques préliminaires</b> .....	76
3.1.1. Définition .....	76
3.1.2. Condition d'application .....	76
3.1.3. Conditions initiales .....	76
<b>3.2. Tassement dans le temps sous une charge donnée</b> .....	76
<b>3.3. Tassement en fonction de la charge</b> .....	79
<b>4. THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA CONSOLIDATION UNIDIMENSIONNELLE</b> .....	80
<b>5. CONSOLIDATION D'UNE COUCHE DRAINÉE PAR LES DEUX FACES</b> .....	82
<b>6. CAS PARTICULIERS</b> .....	83
6.1. Multicouche compressible .....	83
6.2. Prise en compte du temps de chargement .....	83
<b>7. ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ À L'ŒDOMÈTRE</b> .....	85
7.1. Description de l'appareillage .....	85
7.2. Procédures d'essai .....	86
7.3. Caractéristiques de compressibilité .....	88
7.4. Classification des sols vis-à-vis de la compressibilité .....	89
7.4.1. Différents états de consolidation .....	89
7.4.2. Comportement des sols selon leur état de consolidation .....	91
7.5. Courbe de consolidation. Détermination du coefficient $C_v$ .....	92
7.6. Consolidation secondaire .....	93
<b>8. APPLICATIONS PRATIQUES DE LA CONSOLIDATION</b> .....	94
<b>9. PRÉCHARGEMENT DU SOL</b> .....	94
<b>10. DRAINS VERTICAUX</b> .....	95
<b>11. CONSOLIDATION PAR LE VIDE</b> .....	98
<b>EXERCICES</b> .....	98
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	100
<b>CHAPITRE 5. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES SOLS</b> .....	<b>101</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	101
<b>2. RÉPARTITION DES CONTRAINTES AUTOUR D'UN POINT</b> .....	102
2.1. Rappel de mécanique des milieux continus .....	102
2.2. Définition et conventions de signe .....	103

2.3. Propriétés du cercle de Mohr .....	104
<b>3. LES SOLS ET LA THÉORIE DE L'ÉLASTICITÉ .....</b>	<b>107</b>
3.1. Rappel de quelques notions .....	107
3.2. Modules drainé et non drainé.....	107
3.3. Champs d'application de l'élasticité .....	109
3.3.1. Divergences avec la théorie de l'élasticité .....	109
3.3.2. Différents modules d'élasticité .....	110
3.4. Ordres de grandeur .....	110
3.5. Relation entre le module œdométrique et le module d'élasticité drainé.....	111
<b>4. LES SOLS ET LA THÉORIE DE LA PLASTICITÉ.....</b>	<b>112</b>
4.1. Courbe intrinsèque, critère de Mohr-Coulomb .....	112
4.2. État d'équilibre limite des sols pulvérulents .....	113
4.3. Sols cohérents – Théorème des états correspondants.....	116
4.4. Propriétés particulières de la droite intrinsèque et du cercle de Mohr.....	117
4.5. Directions conjuguées .....	118
<b>5. MESURE DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS .....</b>	<b>119</b>
5.1. Détermination des caractéristiques de plasticité $\phi$ et $c$ .....	119
5.1.1. Description sommaire de l'essai de cisaillement rectiligne .....	119
5.1.2. Description sommaire des essais triaxiaux.....	121
5.2. Conditions particulières d'essai.....	123
5.2.1. Consolidation .....	123
5.2.2. Drainage.....	124
5.2.3. Vitesse d'essai.....	124
5.3. Principales caractéristiques mécaniques d'un sol .....	124
5.3.1. Caractéristiques apparentes .....	124
5.3.2. Caractéristiques effectives .....	125
5.3.3. Caractéristiques consolidées non drainées .....	126
5.4. Exemples d'application pratique des différents essais.....	127
5.4.1. Exemple d'application des caractéristiques apparentes $\phi_{uu}$ , $c_{uu}$ et effectives $\phi'$ , $c'$ .....	127
5.4.2. Exemple d'application du facteur d'augmentation de la cohésion $\lambda_{cu}$ .....	128
5.5. Essai de compression simple .....	129
5.6. Mesure des caractéristiques d'élasticité .....	130
<b>6. COMPLÉMENTS SUR LA RHÉOLOGIE DES SOLS .....</b>	<b>130</b>
6.1. Critères de rupture - État critique - Dilatance - Contractance.....	130
6.1.1. Comportement des sables .....	130
6.1.2. Comportement des argiles .....	132

6.2. Chemin des contraintes .....	134
6.3. Modèles rhéologiques .....	134
<b>7. LIQUÉFACTION DES SOLS</b> .....	<b>137</b>
7.1. Description du phénomène.....	137
7.2. Catégories de sols sensibles à la liquéfaction .....	137
7.3. Étude du risque de liquéfaction.....	138
<b>EXERCICES</b> .....	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>139</b>

**CHAPITRE 6. RECONNAISSANCE DES SOLS** **141**

<b>1. ÉTUDES GÉOTECHNIQUES</b> .....	<b>141</b>
1.1. Mission du géotechnicien .....	141
1.2. L'enquête préliminaire .....	142
1.3. Différentes phases de l'étude géotechnique.....	142
1.4. Programme de l'étude géotechnique.....	143
1.4.1. Nature des investigations.....	143
1.4.2. Densité des sondages et essais.....	143
1.4.3. Profondeur d'investigation .....	144
1.5. Repérage et nivellement des sondages .....	144
<b>2. GÉOPHYSIQUE</b> .....	<b>144</b>
2.1. Principes généraux.....	144
2.2. Gravimétrie .....	145
2.2.1. Principe .....	145
2.2.2. Applications .....	145
2.2.3. Mise en œuvre .....	146
2.2.4. Limites d'utilisation.....	146
2.3. Méthodes sismiques .....	147
2.3.1. Principe .....	147
2.3.2. Sismique réfraction .....	148
2.4. Méthodes électriques .....	150
2.4.1. Principe .....	150
2.4.2. Applications.....	151
2.4.3. Description des méthodes usuelles.....	151
2.4.4. Limites d'utilisation.....	153
2.5. Électromagnétisme.....	153
2.5.1. Principe .....	153
2.5.2. Application.....	153

2.5.3. Mise en œuvre .....	154
2.5.4. Limites d'utilisation .....	156
<b>2.6. Domaines d'application des méthodes géophysiques .....</b>	<b>156</b>
<b>3. SONDAGES ET FORAGES .....</b>	<b>156</b>
<b>3.1. Définitions .....</b>	<b>156</b>
3.1.1. Sondages par puits, tranchée, fouille et galerie .....	158
3.1.2. Sondages carottés .....	158
3.1.3. Sondages semi-destructifs .....	158
3.1.4. Sondages destructifs .....	159
<b>3.2. Sondages carottés .....</b>	<b>159</b>
3.2.1. Objectifs .....	159
3.2.2. Techniques de carottage .....	160
3.2.3. Choix des techniques de carottage .....	162
3.2.4. Coupe de sondage .....	164
<b>3.3. Forages destructifs .....</b>	<b>164</b>
3.3.1. Introduction .....	164
3.3.2. Opérations liées à la foration .....	164
3.3.3. Techniques de foration .....	168
3.3.4. Choix des techniques de foration .....	169
3.3.5. Diagraphies instantanées .....	169
<b>3.4. Diagraphies différées .....</b>	<b>170</b>
3.4.1. Présentation .....	170
3.4.2. Différents types de diagraphies différées .....	173
3.4.3. Géophysique de forage .....	173
<b>4. ESSAIS MÉCANIQUES .....</b>	<b>173</b>
<b>4.1. Essais par battage .....</b>	<b>173</b>
4.1.1. Présentation .....	173
4.1.2. Essai de pénétration au carottier .....	173
4.1.3. Essai de pénétration dynamique - Sondage au pénétromètre dynamique .....	175
<b>4.2. Essai de pénétration statique (CPT) et piézocône .....</b>	<b>179</b>
4.2.1. Principe .....	179
4.2.2. Types d'appareil - Appareil normalisé .....	179
4.2.3. Résultats .....	180
4.2.5. Piézocône .....	182
<b>4.3. Essai au pressiomètre Ménard .....</b>	<b>183</b>
4.3.1. Présentation .....	183
4.3.2. Principe de l'essai .....	183
4.3.3. Appareillage .....	183
4.3.4. Réalisation de l'essai - Courbe brute .....	185
4.3.5. Résultats - Courbes corrigées .....	186
4.3.6. Présentation des résultats - Forage pressiométrique .....	187
4.3.7. Principes théoriques .....	187



## FONDATEMENTS ET OUVRAGES EN TERRE

4.3.8. Corrélation entre module pressiométrique et œdométrique Coefficient rhéologique .....	191
4.3.9. Classification conventionnelle des sols .....	192
<b>4.4. Essai de cisaillement au phicomètre.....</b>	<b>193</b>
4.4.1. Présentation.....	193
4.4.2. Principe .....	193
4.4.3. Description de l'appareil.....	194
4.4.4. Interprétation - Domaine d'application .....	195
4.4.5. Comparaison avec les essais de laboratoire .....	196
<b>4.5. Essai scissométrique en place .....</b>	<b>198</b>
4.5.1. Présentation.....	198
4.5.2. Principe de l'essai.....	198
4.5.3. Appareillage et procédure d'essai.....	199
4.5.4. Résultats.....	201
4.5.5. Utilisation - Correction.....	201
<b>4.6. Corrélations entre essais .....</b>	<b>202</b>
<b>4.7. Instrumentation et suivi des ouvrages .....</b>	<b>202</b>
<b>4.8. Choix des techniques d'investigation.....</b>	<b>204</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>204</b>

## DEUXIÈME PARTIE — STABILITÉ DES OUVRAGES

<b>CHAPITRE 7. INTRODUCTION AU CALCUL AUX ÉTATS LIMITES</b>	<b>211</b>
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE .....	211
2. SITUATIONS ET ACTIONS .....	212
3. COMBINAISONS D'ACTIONS - SOLLICITATIONS .....	212
4. JUSTIFICATIONS DES OUVRAGES .....	215
5. VERS LES EUROCODES .....	216
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>216</b>
<b>CHAPITRE 8. STABILITÉ DES PENTES ET DES TALUS</b>	<b>219</b>
1. INTRODUCTION - CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	219
1.1. Pentes naturelles.....	219
1.2. Talus artificiels .....	220

<b>2. DESCRIPTION DES PRINCIPAUX TYPES DE MOUVEMENT</b> .....	220
<b>2.1. Écroulements et chutes de pierres</b> .....	220
<b>2.2. Glissements</b> .....	220
2.2.1. Glissement plan .....	220
2.2.2. Glissement rotationnel simple .....	220
2.2.3. Glissement rotationnel complexe .....	222
<b>2.3. Fluage et solifluxion</b> .....	222
2.3.1. Fluage .....	222
2.3.2. Solifluxion .....	223
<b>2.4. Coulées boueuses</b> .....	223
<b>2.5. Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressibles</b> .....	223
<b>2.6. Talus en remblai sur sols compressibles</b> .....	224
<b>2.7. Stabilité sous les soutènements</b> .....	225
<b>2.8. Diguees et barrages en terre</b> .....	225
<b>3. STABILITÉ EN RUPTURE CIRCULAIRE AVEC COEFFICIENT DE SÉCURITÉ GLOBAL</b> .....	225
<b>3.1. Méthode des tranches de Fellenius</b> .....	225
3.1.1. Stabilité selon un cercle donné .....	225
3.1.2. Recherche du coefficient de sécurité minimal .....	229
<b>3.2. Prise en compte des nappes et des écoulements</b> .....	231
3.2.1. Nappe statique .....	231
3.2.2. Prise en compte des écoulements au-dessus du niveau aval .....	231
3.2.3. Prise en compte des écoulements en dessous du niveau aval .....	233
<b>3.3. Méthodes des tranches de Bishop</b> .....	234
3.3.1. Méthode détaillée .....	234
3.3.2. Méthode de Bishop simplifiée .....	234
<b>3.4. Choix de la méthode et du coefficient de sécurité</b> .....	235
<b>4. STABILITÉ EN RUPTURE CIRCULAIRE AUX ÉTATS LIMITES</b> .....	236
<b>5. STABILITÉ DES PENTES EN RUPTURE PLANE</b> .....	238
<b>5.1. Pente indéfinie - Rupture selon un plan parallèle à la pente</b> .....	238
5.1.1. Décomposition des forces .....	238
5.1.2. Coefficient de sécurité global .....	239
5.1.3. Calcul aux États Limites .....	240
<b>5.2. Pente de hauteur finie</b> .....	240
<b>6. STABILITÉ EN RUPTURE NON CIRCULAIRE</b> .....	242
<b>7. ABAQUES ET FORMULES</b> .....	242
<b>7.1. Talus dans un sol pulvérulent</b> .....	242
7.1.1. Sans écoulement .....	242
7.1.2. Avec écoulement .....	243

7.2. Talus dans un sol homogène cohérent.....	243
7.2.1. Sols purement cohérents - Abaques de Taylor.....	243
7.2.2. Sols cohérents à frottement interne.....	247
7.3. Talus verticaux.....	249
<b>8. CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES.....</b>	<b>251</b>
<b>9. DIGUES ET BARRAGES EN TERRE.....</b>	<b>254</b>
9.1. Principaux types de barrages en terre.....	254
9.2. Réseaux d'écoulement.....	255
9.2.1. Détermination de la surface phréatique.....	255
9.2.2. Débit, pression interstitielle, règle de Lane.....	256
9.3. Stabilité des talus.....	258
9.3.1. Stabilité en fin de construction.....	258
9.3.2. Stabilité en régime permanent.....	259
9.3.3. Vidange rapide.....	259
<b>10. STABILITÉ EN ZONE SISMIQUE.....</b>	<b>260</b>
10.1. Préambule.....	260
10.2. Principe du modèle statique équivalent.....	260
<b>11. CONFORTEMENT DES TALUS.....</b>	<b>261</b>
<b>EXERCICES.....</b>	<b>263</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>264</b>
<b>CHAPITRE 9. ACTION DES TERRES SUR LES SOUTÈNEMENTS.....</b>	<b>267</b>
Introduction.....	267
<b>1. ÉTATS D'ÉQUILIBRE LIMITE.....</b>	<b>268</b>
1.1. Définitions.....	268
1.1.1. Sol au repos.....	268
1.1.2. Équilibre limite de butée.....	269
1.1.3. Équilibre limite de poussée.....	269
1.2. Étude d'un cas simple.....	270
1.3. Plan de l'étude détaillée de la poussée et de la butée.....	273
1.3.1. Étude d'un milieu pulvérulent pesant en équilibre limite.....	273
1.3.2. Étude d'un milieu non pesant surchargé.....	273
1.3.3. Influence de la cohésion.....	273
1.3.4. Cas général.....	274
1.4. Étude du milieu pesant pulvérulent.....	274
1.4.1. Équilibres limites de Rankine.....	274
1.4.2. Équilibres limites généraux.....	278

<b>1.5. Étude d'un milieu non pesant surchargé et pulvérulent.....</b>	<b>281</b>
1.5.1. Hypothèses.....	281
1.5.2. Étude de l'équilibre de poussée.....	282
1.5.3. Étude de l'équilibre de la butée.....	284
<b>1.6. Milieux cohérents.....</b>	<b>286</b>
1.6.1. Prise en compte de la cohésion.....	286
1.6.2. Rugosité (contact écran-sol).....	287
1.6.3. Influence de la cohésion sur le coefficient de sécurité.....	287
<b>1.7. Étude particulière du milieu purement cohérent.....</b>	<b>288</b>
<b>1.8. Tableaux récapitulatifs.....</b>	<b>289</b>
<b>2. DÉTERMINATION PRATIQUE DES POUSSÉES ET BUTÉES SUR LES ÉCRANS.....</b>	<b>291</b>
<b>2.1. Simplifications – rugosité – diagramme de pression des terres.....</b>	<b>291</b>
2.1.1. Remarques préliminaires.....	291
2.1.2. Rugosité – inclinaison de la contrainte.....	292
2.1.3. Diagramme de pression des terres.....	293
<b>2.2. Calcul pratique des contraintes de poussée et de butée.....</b>	<b>294</b>
2.2.1. Coin de Coulomb.....	295
2.2.2. Sols stratifiés.....	296
2.2.3. Présence d'une nappe.....	298
2.2.4. Surface libre de forme quelconque.....	299
2.2.5. Talus limité en tête de l'écran – Méthode de Krey.....	299
2.2.6. Surcharge uniforme semi-infinie.....	300
2.2.7. Surcharge partielle de longueur infinie.....	301
2.2.8. Surcharges locales.....	303
<b>2.3. Tranchées blindées.....</b>	<b>304</b>
2.3.1. Détermination de la pression des terres.....	304
2.3.2. Action des surcharges.....	307
2.3.3. Stabilité du fond de fouille.....	307
<b>2.4. Sollicitations sismiques.....</b>	<b>307</b>
2.4.1. Principe général du calcul statique équivalent.....	307
2.4.2. Poussée active en sol homogène - Méthode de Mononobe-Okabe.....	308
<b>3. PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES.....</b>	<b>309</b>
<b>3.1. Avertissement – Classification des soutènements.....</b>	<b>309</b>
<b>3.2. Murs de soutènement autostables.....</b>	<b>310</b>
3.2.1. Définition des actions.....	310
3.2.2. Combinaisons des actions.....	311
3.2.3. Stabilité au renversement (E.L.U.).....	312
3.2.4. Stabilité du sol de fondation (E.L.U. et E.L.S.).....	313
3.2.5. État limite de service de décompression du sol.....	314
3.2.6. État limite ultime de glissement.....	314
3.2.7. États limites concernant les matériaux constitutifs du mur.....	315
3.2.8. État limite de stabilité d'ensemble.....	315

<b>3.3. Rideaux de palplanches et parois diverses .....</b>	<b>315</b>
3.3.1. Classification et méthodes de calcul.....	315
3.3.2. Calcul à la rupture d'un rideau encastré en pied (sans tirant).....	316
3.3.3. Calcul à la rupture d'un rideau ancré en tête et encastré en pied .....	318
3.3.4. Méthode élasto-plastique .....	321
<b>EXERCICES .....</b>	<b>324</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>325</b>
<b>CHAPITRE 10. FONDATIONS SUPERFICIELLES .....</b>	<b>327</b>
<b>1. DESCRIPTION ET COMPORTEMENT .....</b>	<b>327</b>
<b>1.1. Définitions .....</b>	<b>327</b>
<b>1.2. Textes réglementaires .....</b>	<b>328</b>
<b>1.3. Comportement d'une semelle chargée.....</b>	<b>328</b>
1.3.1. Charge et contrainte ultime.....	328
1.3.2. Principe de justification d'une semelle superficielle.....	329
1.3.3. Contrainte de référence.....	331
<b>2. DÉTERMINATION DE LA CONTRAINTE ULTIME.....</b>	<b>332</b>
<b>2.1. Analyse qualitative de la rupture .....</b>	<b>332</b>
<b>2.2. Détermination de la charge limite d'une semelle à l'aide de la théorie de la plasticité.....</b>	<b>332</b>
2.2.1. Formule générale .....	332
2.2.2. Détermination des coefficients $N_\gamma$ , $N_q$ et $N_c$ selon A. Caquot et J. Kérisel .....	334
2.2.3. Détermination de la charge ultime sur une semelle isolée.....	338
<b>2.3. Détermination de la charge limite sur une semelle à l'aide des essais au pressiomètre Ménard .....</b>	<b>338</b>
2.3.1. Formule générale .....	339
2.3.2. Pression limite équivalente $p_e^*$ .....	339
2.3.3. Hauteur d'encastrement équivalente $D_e$ .....	340
2.3.4. Valeurs numériques du coefficient de portance.....	341
<b>2.4. Détermination de la charge limite sur une semelle à l'aide des essais au pénétromètre statique.....</b>	<b>342</b>
2.4.1. Formule générale .....	342
2.4.2. Résistance de pointe équivalente.....	342
2.4.3. Valeurs numériques du coefficient de portance $k_c$ .....	342
<b>2.5. Détermination de la charge limite sur une semelle par les essais de pénétration dynamique et S.P.T. ....</b>	<b>343</b>
2.5.1. Pénétromètre dynamique .....	343
2.5.2. Essai de pénétration au carottier – S.P.T. ....	343
<b>2.6. Semelles, charges et sol inclinés.....</b>	<b>344</b>

2.6.1. Description – Application de la théorie de la plasticité .....	344
2.6.2. Autres approches .....	348
<b>2.7. Semelles superficielles ancrées dans un bicouche</b> .....	349
2.7.1. Présence d'une couche d'argile en profondeur .....	349
2.7.2. Présence d'un substratum rigide en profondeur .....	351
2.7.3. Fondation sur des sols hétérogènes .....	351
<b>3. ESTIMATION DES TASSEMENTS</b> .....	352
3.1. Méthodologie – Contraintes de contact sous la fondation .....	352
3.2. Détermination du tassement par la théorie de l'élasticité – Coefficient de réaction du sol .....	354
3.3. Détermination du tassement par la méthode d'intégration par tranches.....	356
3.3.1. Principe .....	356
3.3.2. Répartition des contraintes en profondeur sous une charge ponctuelle .....	356
3.3.3. Répartition des contraintes en profondeur sous une semelle souple.....	357
3.3.4. Contraintes dans l'angle d'un rectangle et au centre d'une semelle circulaire...	359
3.3.5. Effet Radier .....	360
3.3.6. Diagramme de répartition des contraintes en profondeur – Méthode des tranches.....	361
3.3.7. Tassement total – Correction de A. W. Skempton et L. Bjerrum .....	363
3.3.8. Semelle rigide .....	366
3.4. Calcul des tassements par la méthode pressiométrique.....	366
3.4.1. Formule générale .....	366
3.4.2. Valeurs de $E_c$ et $E_d$ .....	367
3.5. Tassements admissibles.....	370
3.5.1. Tassement total et tassement différentiel.....	370
3.5.2. Estimation des tassements totaux .....	371
3.5.3. Estimation des tassements différentiels .....	371
3.5.4. Tassements admissibles .....	371
3.6. Protection contre le gel – Fondations sur sols gonflants .....	373
3.6.1. Protection contre le gel.....	373
3.6.2. Dispositions constructives spécifiques relatives aux sols gonflants et rétractables .....	375
<b>4. FONDATION DES MACHINES VIBRANTES</b> .....	376
4.1. Introduction.....	376
4.2. Réponse d'une machine vibrante .....	377
4.2.1. Principes du calcul.....	377
4.2.2. Paramètres dynamiques du sol .....	379
4.3. Tassements dus aux vibrations.....	382
<b>EXERCICES</b> .....	382
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	384

<b>CHAPITRE 11. FONDATIONS PROFONDES ET SEMI-PROFONDES</b>	<b>387</b>
<b>1. DÉFINITIONS — PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT</b>	387
1.1. Définitions	387
1.2. Pieu soumis à une charge verticale	388
1.2.1. Détermination de la charge limite d'un pieu isolé – Formules générales	388
1.2.2. Groupe de pieux	390
1.3. Pieu soumis à des efforts parasites et divers	390
1.4. Résistance des matériaux constitutifs d'un pieu	391
1.5. Méthodes pratiques de détermination de la charge ultime d'un pieu sollicité selon son axe	391
<b>2. CLASSIFICATION DES FONDATIONS PROFONDES</b>	392
<b>3. COMPORTEMENT D'UN PIEU SOUMIS À UNE CHARGE VERTICALE</b>	393
3.1. Résistance limite de pointe	393
3.2. Mobilisation du frottement latéral	394
3.3. Mobilisation progressive de la résistance du sol	394
<b>4. DONNÉES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES DE DIMENSIONNEMENT SOUS CHARGE VERTICALE — MÉTHODE PAR ESSAIS DE LABORATOIRE</b>	397
4.1. Contrainte limite de pointe – Ancrage critique	397
4.2. Frottement latéral limite	400
<b>5. DIMENSIONNEMENT D'UN PIEU ISOLÉ SOUS CHARGE VERTICALE À L'AIDE DES ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE</b>	402
5.1. Domaine d'application Hauteur d'encastrement équivalente	402
5.2. Contrainte limite de pointe	403
5.2.1. Formule générale	403
5.2.2. Couche sous-jacente peu résistante	405
5.3. Frottement latéral unitaire limite	406
<b>6. DIMENSIONNEMENT D'UN PIEU ISOLÉ SOUS CHARGE VERTICALE PAR LA MÉTHODE PRESSIOMÉTRIQUE</b>	408
6.1. Domaine d'application – Hauteur d'encastrement équivalente	408
6.2. Contrainte limite de pointe	408
6.2.1. Formule générale	408
6.2.2. Valeurs numériques selon le fascicule 62	409
6.3. Frottement latéral unitaire limite	410
6.3.1. Méthodologie générale	410
6.3.2. Valeurs numériques de $q_s$ selon le fascicule 62	411
<b>7. DIMENSIONNEMENT DES PIEUX SOLLICITÉS EN COMPRESSION OU EN TRACTION</b>	412

<b>8. TASSEMENT DES PIEUX</b> .....	414
<b>9. PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE — FORMULES DE BATTAGE — ESSAI DE CHARGEMENT DYNAMIQUE</b> .....	415
<b>10. GROUPE DE PIEUX</b> .....	415
<b>10.1. Comportement d'un groupe de pieux</b> .....	415
<b>10.2. Sécurité vis-à-vis de la rupture du groupe de pieux</b> .....	416
10.2.1. Méthode de la pile fictive de K. Terzaghi et R. Peck .....	416
10.2.2. Formule de Converse-Labarre .....	417
<b>10.3. Tassement d'un groupe de pieux</b> .....	418
<b>10.4. Dispositions réglementaires</b> .....	418
<b>11. PIEUX SOUMIS À DES SOLLICITATIONS NON VERTICALES EN TÊTE</b> .....	419
<b>11.1. Nature des sollicitations</b> .....	419
<b>11.2. Lois d'interaction sol-pieu</b> .....	420
<b>11.3. Résolution dans le domaine élastique</b> .....	423
11.3.1. Équations générales .....	423
11.3.2. Pieu à géométrie et inertie constantes et sol homogène.....	424
11.3.3. Applications pratiques .....	426
<b>12. EFFORTS PARASITES SUR LES PIEUX</b> .....	426
<b>12.1. Frottement négatif</b> .....	426
12.1.1. Description du phénomène .....	426
12.1.2. Méthode de calcul.....	427
12.1.3. Application pratique .....	430
12.1.4. Frottement négatif sur les pieux d'un groupe.....	431
<b>12.2. Fluage latéral d'une couche compressible</b> .....	433
12.2.1. Description du phénomène .....	433
12.2.2. Méthode de Tschebotariouff .....	433
12.2.3. Principe de la méthode en $g(z)$ .....	434
<b>12.3. Flambement des pieux</b> .....	435
12.3.1. Méthode de M. Mandel .....	436
12.3.2. Pieu avec hauteur libre .....	437
12.3.3. Prise en compte d'un défaut de forme.....	437
<b>13. FONDATIONS SEMI-PROFONDES</b> .....	437
<b>13.1. Définition et description des sollicitations</b> .....	437
<b>13.2. Fondations semi-profondes soumises à une charge verticale centrée</b> .....	438
13.2.1. Détermination de la contrainte de rupture $q'_u$ .....	438
13.2.2. Estimation des tassements .....	440
<b>13.3. Fondations semi-profondes soumises à un effort d'arrachement</b> .....	442
13.3.1. Domaine d'application – Types de massif étudiés .....	442
13.3.2. Détermination de l'effort d'arrachement à la rupture $Q_f$ .....	442



## FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

<b>13.4. Fondations semi-profondes soumises à des efforts latéraux et de renversement</b> .....	444
13.4.1. Méthode de M. Cassan .....	444
13.4.2. Méthode du Réseau d'État.....	444
13.4.3. Méthode simplifiée .....	444
<b>14. CONTRÔLE DE L'INTÉGRITÉ DES PIEUX</b> .....	447
<b>EXERCICES</b> .....	448
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	449
<b>CHAPITRE 12. RENFORCEMENT DES SOLS ET FONDATIONS MIXTES</b> .....	<b>451</b>
Présentation générale .....	451
Avertissement.....	451
<b>1. SOUTÈNEMENTS EN SOLS RENFORCÉS</b> .....	452
<b>1.1. La Terre Armée (armatures peu extensibles)</b> .....	452
1.1.1. Description.....	452
1.1.2. Principes de dimensionnement .....	454
1.1.3. Choix et mise en œuvre du remblai.....	457
1.1.4. Applications des ouvrages en Terre Armée.....	457
1.1.5. Autres procédés de renforcement avec des armatures peu extensibles.....	457
<b>1.2. Murs en sols renforcés par des armatures souples et « extensibles »</b> .....	458
1.2.1. Description.....	458
1.2.2. Principales méthodes de dimensionnement.....	459
1.2.3. Calcul à la rupture aux états limites ultimes .....	460
1.2.4. Étude en déformations .....	463
1.2.5. Applications .....	463
<b>1.3. Clouage des sols</b> .....	464
1.3.1. Description.....	464
1.3.2. Principes de dimensionnement .....	465
<b>2. FONDATIONS MIXTES</b> .....	472
<b>2.1. Principe</b> .....	472
<b>2.2. Définitions et hypothèses</b> .....	473
<b>2.3. Détermination de la charge limite d'une fondation mixte pour <math>H \geq B_s</math></b> .....	474
<b>2.4. Estimation des tassements – Cas général <math>H \geq B_s</math></b> .....	474
2.4.1. Principe – Compressibilité de la fondation mixte .....	474
2.4.2. Lois charge-déformation.....	475
<b>2.5. Cas particulier des pieux courts : <math>H &lt; B_s</math></b> .....	477
<b>3. RENFORCEMENT DES SOLS D'ASSISE</b> .....	478

<b>3.1. Renforcement par inclusions rigides</b> .....	478
3.1.1. Principe .....	478
3.1.2. Justification d'un remblai reposant sur des inclusions rigides traversantes.....	479
3.1.3. Justification d'un dallage ou d'un radier souple reposant sur des inclusions rigides traversantes .....	484
<b>3.2. Colonnes de sol stabilisé : jet-grouting, COL MIX, etc.</b> .....	485
3.2.1. Jet-grouting .....	485
3.2.2. COL MIX.....	487
<b>3.3. Colonnes ballastées et autres inclusions souples</b> .....	488
3.3.1. Description .....	488
3.3.2. Dimensionnement .....	490
3.3.3. Applications .....	490
3.3.4. Contrôle .....	491
<b>3.4. Injection solide</b> .....	491
3.4.1. Description .....	491
3.4.2. Éléments technologiques et critères d'arrêt.....	492
3.4.3. Dimensionnement – Contrôles .....	492
3.4.4. Applications .....	492
<b>3.5. Vibroflottation</b> .....	493
3.5.1. Description – domaine d'application.....	493
3.5.2. Applications .....	494
3.5.3. Contrôle .....	494
<b>3.6. Pilonnage intensif</b> .....	494
3.6.1. Principe .....	494
3.6.2. Résultats .....	495
3.6.3. Contrôles .....	495
3.6.4. Applications .....	495
<b>3.7. Injections classiques</b> .....	495
<b>3.8. Autres méthodes de stabilisation    basées sur la théorie de la consolidation</b> .....	497
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	497
<b>SYMBOLES ET NOTATIONS</b> .....	<b>501</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>501</b>
<b>ANNEXE A (CHAPITRE 1)</b> .....	515
<b>ANNEXE B (CHAPITRE 3)</b> .....	518

## FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

---

ANNEXE C (CHAPITRE 3) .....	520
ANNEXE D (CHAPITRE 4) .....	523
ANNEXE E (CHAPITRE 5) .....	527
ANNEXE F (CHAPITRE 8) .....	529
ANNEXE G : NORMES D'ESSAIS DANS LE DOMAINE DE LA GÉOTECHNIQUE .....	532
INDEX .....	541

---