

Gérard Philipponnat
Jean-Louis Grand Hubert

FONDATI ONS ET OUV RAGES EN TERRE

Préface d'André Isnard

EYROLLES



ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 1998, ISBN : 2-212-07218-X - ISBN 13 : 978-2-212-07218-1

© Groupe Eyrolles, 2016 pour la nouvelle présentation, ISBN : 978-2-212-14487-1

À l'occasion du dixième tirage, cet ouvrage a bénéficié d'une nouvelle couverture. L'essentiel du texte et des illustrations reste inchangé.

Sommaire

PREMIÈRE PARTIE — LES SOLS

CHAPITRE 1. LES SOLS ET LA GÉOLOGIE	3
1. INTRODUCTION	3
2. MINÉRALOGIE	4
2.1. Définition	4
2.2. Silicates	4
2.3. Minéraux non silicatés	6
3. PÉTROLOGIE	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
4. LES HÉTÉROGÉNÉITÉS GÉOLOGIQUES	15
BIBLIOGRAPHIE	17
CHAPITRE 2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS	19
1. DÉFINITION DES SOLS - NOTATIONS	19
2. STRUCTURE DES SOLS	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
3. CLASSIFICATION GÉOTECHNIQUE DES SOLS.....	24
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
4. CARACTÉRISTIQUES PONDÉRALES DES SOLS.....	30
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
EXERCICE.....	35
BIBLIOGRAPHIE.....	35

CHAPITRE 3. PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS

Différents états de l'eau dans les sols.....	37
1. PROPRIÉTÉS DE L'EAU LIBRE.....	38
1.1. 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
2. ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS.....	44
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
3. L'EAU CAPILLAIRE	53
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
4. RÉSULTATS PRATIQUES. Formules d'écoulement en régime permanent	60
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
EXERCICES	70
BIBLIOSAPHIE	71

CHAPITRE 4. THÉORIE DE LA CONSOLIDATION **73**

1. DÉFINITION DES CONTRAINTES DANS UN SOL	73
2. SOLS SATURÉS	74
2.1. Contraintes normales.....	74
2.2. Contrainte tangentielle.....	75

FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

3. ÉTUDE QUALITATIVE DE LA CONSOLIDATION	76
3.1. Remarques préliminaires	76
3.1.1. Définition	76
3.1.2. Condition d'application	76
3.1.3. Conditions initiales	76
3.2. Tassement dans le temps sous une charge donnée	76
3.3. Tassement en fonction de la charge	79
4. THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA CONSOLIDATION UNIDIMENSIONNELLE	80
5. CONSOLIDATION D'UNE COUCHE DRAINÉE PAR LES DEUX FACES	82
6. CAS PARTICULIERS	83
6.1. Multicouche compressible	83
6.2. Prise en compte du temps de chargement	83
7. ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ À L'ŒDOMÈTRE	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_c	92
7.6. Consolidation secondaire	93
8. APPLICATIONS PRATIQUES DE LA CONSOLIDATION	94
9. PRÉCHARGEMENT DU SOL	94
10. DRAINS VERTICAUX	95
11. CONSOLIDATION PAR LE VIDE	98
EXERCICES	98
BIBLIOGRAPHIE	100
CHAPITRE 5. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES SOLS	101
1. INTRODUCTION	101
2. RÉPARTITION DES CONTRAINTES AUTOUR D'UN POINT	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
3. LES SOLS ET LA THÉORIE DE L'ÉLASTICITÉ	107
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
4. LES SOLS ET LA THÉORIE DE LA PLASTICITÉ	112
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
5. MESURE DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS	119
5.1. Détermination des caractéristiques de plasticité φ 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 φ_{app} , c_{app} et effectives φ' , c'	127
5.4.2. Exemple d'application du facteur d'augmentation de la cohésion λ_{CG}	128
5.5. Essai de compression simple	129
5.6. Mesure des caractéristiques d'élasticité	130
6. COMPLÉMENTS SUR LA RHÉOLOGIE DES SOLS	130
6.1. Critères de rupture - État critique - Dilatance - Contractance	130
6.1.1. Comportement des sables	130
6.1.2. Comportement des argiles	132

FONDATEIONS ET OUVRAGES EN TERRE

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

CHAPITRE B. RECONNAISSANCE DES SOLS 141

1. ÉTUDES GÉOTECHNIQUES	141
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
2. GÉOPHYSIQUE	144
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
2.6. Domaines d'application des méthodes géophysiques	156
3. SONDAGES ET FORAGES	156
3.1. Définitions	156
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
3.2. Sondages carottés	159
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
3.3. Forages destructifs	164
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
3.4. Diagraphies différées	170
3.4.1. Présentation	170
3.4.2. Différents types de diagraphies différées	173
3.4.3. Géophysique de forage	173
4. ESSAIS MÉCANIQUES	173
4.1. Essais par battage	173
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
4.2. Essai de pénétration statique (CPT) et piézocône	179
4.2.1. Principe	179
4.2.2. Types d'appareil - Appareil normalisé	179
4.2.3. Résultats	180
4.2.5. Piézocône	182
4.3. Essai au pressiomètre Ménard	183
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

FONDACTIONS ET OUVRAGES EN TERRE

4.3.8. Corrélation entre module pressiométrique et œdométrique Coefficient rhéologique	191
4.3.9. Classification conventionnelle des sols	192
4.4. Essai de cisaillement au phicomètre	193
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
4.5. Essai scissométrique en place	198
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
4.6. Corrélations entre essais	202
4.7. Instrumentation et suivi des ouvrages	202
4.8. Choix des techniques d'investigation	204
BIBLIOGRAPHIE	204

DEUXIÈME PARTIE — STABILITÉ DES OUVRAGES

CHAPITRE 7. INTRODUCTION AU CALCUL AUX ÉTATS LIMITES	211
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
BIBLIOGRAPHIE	216
CHAPITRE 8. STABILITÉ DES PENTES ET DES TALUS	219
1. INTRODUCTION - CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN	219
1.1. Pentes naturelles	219
1.2. Talus artificiels	220

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

FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

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
8. CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES.....	251
9. DIGUES ET BARRAGES EN TERRE.....	254
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
10. STABILITÉ EN ZONE SISMIQUE.....	260
10.1. Préambule.....	260
10.2. Principe du modèle statique équivalent.....	260
11. CONFORTEMENT DES TALUS.....	261
EXERCICES.....	263
BIBLIOGRAPHIE.....	264
CHAPITRE 9. ACTION DES TERRES SUR LES SOUTÈNEMENTS.....	267
Introduction.....	267
1. ÉTATS D'ÉQUILIBRE LIMITE.....	268
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

1.5. Étude d'un milieu non pesant surchargé et pulvérulent	281
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
1.6. Milieux cohérents	286
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
1.7. Étude particulière du milieu purement cohérent	288
1.8. Tableaux récapitulatifs	289
2. DÉTERMINATION PRATIQUE DES POUSSÉES ET BUTÉES SUR LES ÉCRANS	291
2.1. Simplifications – rugosité – diagramme de pression des terres	291
2.1.1. Remarques préliminaires.....	291
2.1.2. Rugosité – inclinaison de la contrainte.....	292
2.1.3. Diagramme de pression des terres.....	293
2.2. Calcul pratique des contraintes de poussée et de butée	294
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
2.3. Tranchées blindées	304
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
2.4. Sollicitations sismiques	307
2.4.1. Principe général du calcul statique équivalent.....	307
2.4.2. Poussée active en sol homogène – Méthode de Mononobe-Okabe.....	308
3. PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES	309
3.1. Avertissement – Classification des soutènements	309
3.2. Murs de soutènement autostables	310
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

3.3. Rideaux de palplanches et parois diverses	315
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
EXERCICES	324
BIBLIOGRAPHIE	325

CHAPITRE 10. FONDATIONS SUPERFICIELLES **327**

1. DESCRIPTION ET COMPORTEMENT	327
1.1. Définitions.....	327
1.2. Textes réglementaires.....	328
1.3. Comportement d'une semelle chargée.....	328
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
2. DÉTERMINATION DE LA CONTRAINTE ULTIME	332
2.1. Analyse qualitative de la rupture.....	332
2.2. Détermination de la charge limite d'une semelle à l'aide de la théorie de la plasticité.....	332
2.2.1. Formule générale.....	332
2.2.2. Détermination des coefficients N_x , N_y et N_c selon A. Caquot et J. Kérisel.....	334
2.2.3. Détermination de la charge ultime sur une semelle isolée.....	338
2.3. Détermination de la charge limite sur une semelle à l'aide des essais au pressiomètre Ménard.....	338
2.3.1. Formule générale.....	339
2.3.2. Pression limite équivalente p_{le}^*	339
2.3.3. Hauteur d'encastrement équivalente D_e	340
2.3.4. Valeurs numériques du coefficient de portance.....	341
2.4. Détermination de la charge limite sur une semelle à l'aide des essais au pénétromètre statique.....	342
2.4.1. Formule générale.....	342
2.4.2. Résistance de pointe équivalente.....	342
2.4.3. Valeurs numériques du coefficient de portance k_s	342
2.5. Détermination de la charge limite sur une semelle par les essais de pénétration dynamique et S.P.T.....	343
2.5.1. Pénétromètre dynamique.....	343
2.5.2. Essai de pénétration au carottier – S.P.T.....	343
2.6. Semelles, charges et sol inclinés.....	344

2.6.1. Description – Application de la théorie de la plasticité	344
2.6.2. Autres approches	348
2.7. Semelles superficielles ancrées dans un bicouche	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
3. ESTIMATION DES TASSEMENTS	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
4. FONDATION DES MACHINES VIBRANTES	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
EXERCICES	382
BIBLIOGRAPHIE	384

CHAPITRE 11. FONDATIONS PROFONDES ET SEMI-PROFONDES	387
1. DÉFINITIONS — PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT	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
2. CLASSIFICATION DES FONDATIONS PROFONDES	392
3. COMPORTEMENT D'UN PIEU SOUMIS À UNE CHARGE VERTICALE	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
4. DONNÉES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES DE DIMENSIONNEMENT SOUS CHARGE VERTICALE – MÉTHODE PAR ESSAIS DE LABORATOIRE	397
4.1. Contrainte limite de pointe – Ancrage critique.....	397
4.2. Frottement latéral limite.....	400
5. DIMENSIONNEMENT D'UN PIEU ISOLÉ SOUS CHARGE VERTICALE À L'AIDE DES ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE	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
6. DIMENSIONNEMENT D'UN PIEU ISOLÉ SOUS CHARGE VERTICALE PAR LA MÉTHODE PRESSIOMÉTRIQUE	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_v selon le fascicule 62.....	411
7. DIMENSIONNEMENT DES PIEUX SOLLICITÉS EN COMPRESSION OU EN TRACTION	412

8. TASSEMENT DES PIEUX	414
9. PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE — FORMULES DE BATTAGE — ESSAI DE CHARGEMENT DYNAMIQUE	415
10. GROUPE DE PIEUX	415
10.1. Comportement d'un groupe de pieux	415
10.2. Sécurité vis-à-vis de la rupture du groupe de pieux	416
10.2.1. Méthode de la pile fictive de K. Terzaghi et R. Peck	416
10.2.2. Formule de Converse-Labarre	417
10.3. Tassement d'un groupe de pieux	418
10.4. Dispositions réglementaires	418
11. PIEUX SOUMIS À DES SOLLICITATIONS NON VERTICALES EN TÊTE	419
11.1. Nature des sollicitations	419
11.2. Lois d'interaction sol-pieu	420
11.3. Résolution dans le domaine élastique	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
12. EFFORTS PARASITES SUR LES PIEUX	426
12.1. Frottement négatif	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
12.2. Fluage latéral d'une couche compressible	433
12.2.1. Description du phénomène	433
12.2.2. Méthode de Tschebotarioff	433
12.2.3. Principe de la méthode en $g(z)$	434
12.3. Flambement des pieux	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
13. FONDATIONS SEMI-PROFONDES	437
13.1. Définition et description des sollicitations	437
13.2. Fondations semi-profondes soumises à une charge verticale centrée	438
13.2.1. Détermination de la contrainte de rupture q_u^*	438
13.2.2. Estimation des tassements	440
13.3. Fondations semi-profondes soumises à un effort d'arrachement	442
13.3.1. Domaine d'application — Types de massifs étudiés	442
13.3.2. Détermination de l'effort d'arrachement à la rupture Q_p	442

FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

13.4. Fondations semi-profondes soumises à des efforts latéraux et de renversement.....	444
13.4.1. Méthode de M. Cassan.....	444
13.4.2. Méthode du Réseau d'État.....	444
13.4.3. Méthode simplifiée.....	444
14. CONTRÔLE DE L'INTÉGRITÉ DES PIEUX.....	447
EXERCICES.....	448
BIBLIOGRAPHIE.....	449
CHAPITRE 12. RENFORCEMENT DES SOLS ET FONDATIONS MIXTES	451
Présentation générale.....	451
Avertissement.....	451
1. SOUTÈNEMENTS EN SOLS RENFORCÉS.....	452
1.1. La Terre Armée (armatures peu extensibles).....	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
1.2. Murs en sols renforcés par des armatures souples et « extensibles ».....	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
1.3. Clouage des sols.....	464
1.3.1. Description.....	464
1.3.2. Principes de dimensionnement.....	465
2. FONDATIONS MIXTES.....	472
2.1. Principe.....	472
2.2. Définitions et hypothèses.....	473
2.3. Détermination de la charge limite d'une fondation mixte pour $H \geq B_s$	474
2.4. Estimation des tassements – Cas général $H \geq B_s$	474
2.4.1. Principe – Compressibilité de la fondation mixte.....	474
2.4.2. Lois charge-déformation.....	475
2.5. Cas particulier des pieux courts : $H < B_s$	477
3. RENFORCEMENT DES SOLS D'ASSISE.....	478

3.1. Renforcement par inclusions rigides	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
3.2. Colonnes de sol stabilisé : jet-grouting, COL MIX, etc.	485
3.2.1. Jet-grouting.....	485
3.2.2. COL MIX.....	487
3.3. Colonnes ballastées et autres inclusions souples	488
3.3.1. Description.....	488
3.3.2. Dimensionnement.....	490
3.3.3. Applications.....	490
3.3.4. Contrôle.....	491
3.4. Injection solide	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
3.5. Vibroflottation	493
3.5.1. Description – domaine d'application.....	493
3.5.2. Applications.....	494
3.5.3. Contrôle.....	494
3.6. Pilonnage intensif	494
3.6.1. Principe.....	494
3.6.2. Résultats.....	495
3.6.3. Contrôles.....	495
3.6.4. Applications.....	495
3.7. Injections classiques	495
3.8. Autres méthodes de stabilisation basées sur la théorie de la consolidation	497
BIBLIOGRAPHIE	497

SYMBLES ET NOTATIONS	501
-----------------------------------	------------

ANNEXES	501
----------------------	------------

ANNEXE A (CHAPITRE 1)	515
------------------------------------	-----

ANNEXE B (CHAPITRE 3)	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
