

S. LEROUEIL
J.P. MAGNAN
F. TAVENAS

REMBLAIS SUR ARGILES MOLLES

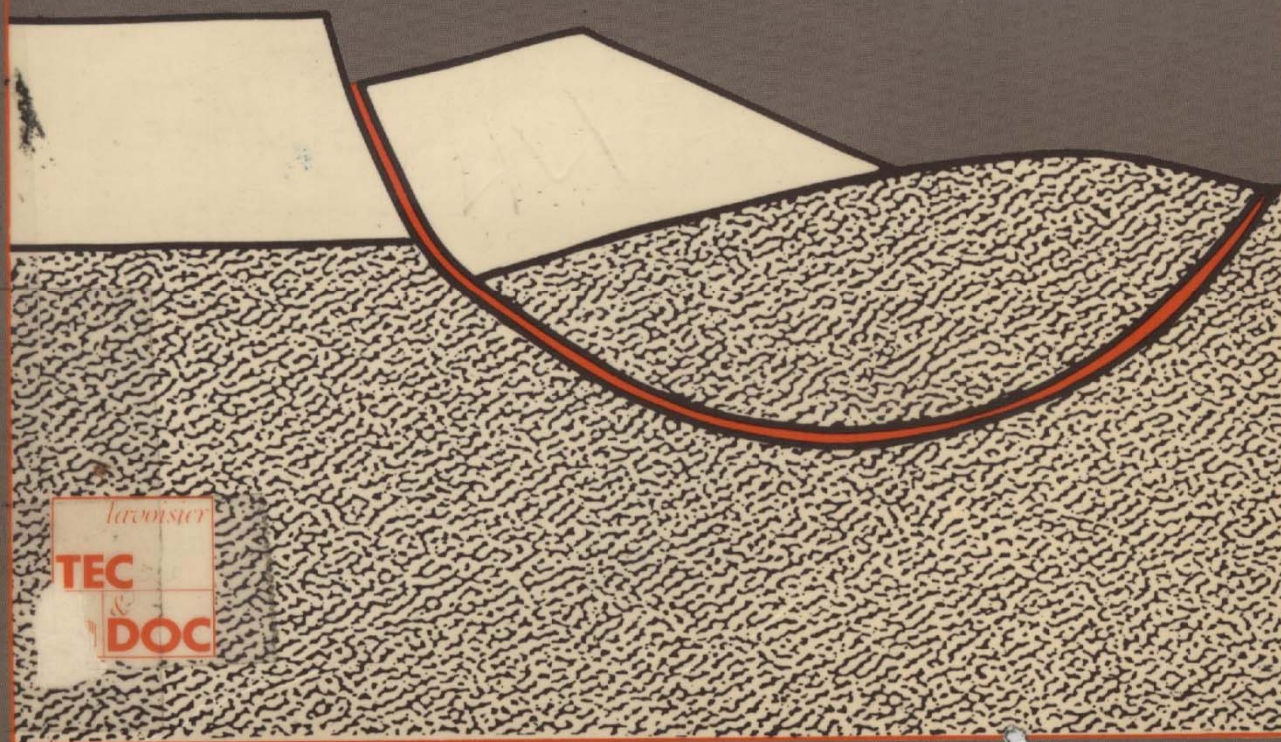


Table des matières

Avant-propos	XV
Chapitre 1 - INTRODUCTION	1
1.1.- Importance des problèmes liés à la construction des remblais sur sols compressibles	1
1.2.- Distribution et particularités des dépôts de sols compressibles à travers le monde.	8
1.2.1. Milieux de sédimentation et dépôts argileux	8
♦ 1.2.1.1. Les argiles marines ♦ 1.2.1.2. Les argiles lacustres ♦ 1.2.1.3. Les argiles deltaïques ♦ 1.2.1.4. Les argiles côtières et lagunaires	
1.2.2. Dépôts argileux dans le monde	14
♦ 1.2.2.1. Amérique du Nord ♦ 1.2.2.2. Amérique centrale et Antilles ♦ 1.2.2.3. Amérique du Sud ♦ 1.2.2.4. Europe du Nord ♦ 1.2.2.5. Europe Continentale ♦ 1.2.2.6. URSS ♦ 1.2.2.7. Afrique ♦ 1.2.2.8. Proche Orient et Moyen Orient ♦ 1.2.2.9. Sous Continent Indien ♦ 1.2.2.10. Asie du Sud-Est ♦ 1.2.2.11. Australie et Iles du Pacifique	
1.3.- Historique de la technologie des remblais sur sols mous.	26
1.3.1. Les développements initiaux	26
1.3.2. La période 1948-1970.	28
1.3.3. La période de 1970 à nos jours.	31
1.4.- La coopération Franco-Québécoise	35
1.5.- Objectifs et organisation du livre	36
Chapitre 2 - PRINCIPES GÉNÉRAUX DU COMPORTEMENT DES ARGILES	37
2.1.- Introduction	37
2.2.- Propriétés physiques des sols.	37
2.2.1. Description	37

2.2.2. Classification des sols	40
2.3.- Contraintes - Chemins des contraintes.	43
2.3.1. Contraintes	43
2.3.2. Représentation de l'état des contraintes.	44
2.3.3. Chemins des contraintes	46
2.4.- Déformations - Relations Contraintes-Déformations.	48
2.4.1. Déformations	48
2.4.2. Relations contraintes-déformations.	48
♦ 2.4.2.1. <i>Elasticité linéaire</i> ♦ 2.4.2.2. <i>Applications de l'élasticité linéaire aux sols</i> ♦ 2.4.2.3. <i>Plasticité et rupture</i>	
2.5.- Etat limite et état critique des argiles idéales	52
2.5.1. Consolidation isotrope.	53
2.5.2. Etat limite des argiles idéales	54
2.5.3. Etat critique des argiles idéales	55
2.5.4. Argiles surconsolidées.	56
2.5.5. Quelques exemples d'application des principes d'état limite et d'état critique	57
♦ 2.5.5.1. <i>Essais de cisaillement drainé</i> ♦ 2.5.5.2. <i>Essais de cisaillement non drainé</i> ♦ 2.5.5.3. <i>Essai de consolidation anisotrope</i>	
2.6.- Etat limite des argiles naturelles	61
2.6.1. Détermination des courbes d'état limite des argiles naturelles	62
♦ 2.6.1.1. <i>Techniques expérimentales</i> ♦ 2.6.1.2. <i>Exemple de détermination d'une courbe d'état limite</i> ♦ 2.6.1.3. <i>Caractéristiques des courbes d'état limite d'argiles naturelles (modèle YLIGHT)</i>	
2.6.2. Comportement de l'argile dans le domaine normalement consolidé.	67
2.7.- Etat critique des argiles naturelles	68
2.7.1. Argile à l'état normalement consolidé	68
2.7.2. Argile à l'état surconsolidé.	69
2.7.3. Etat résiduel	69
2.7.4. Résistance au cisaillement des argiles.	69
2.8.- Effets de la vitesse et du temps sur le comportement des argiles.	70
2.8.1. Effets du vieillissement.	70
2.8.2. Effets de la vitesse ou de la durée de chargement	71
2.9.- Phénomènes de structure dans les argiles	73
2.9.1. Structure	73
2.9.2. Effets de la destructuration.	74
2.9.3. Implications des phénomènes de destructuration.	74
♦ 2.9.3.1. <i>Remaniement lors du prélèvement des argiles in situ</i> ♦ 2.9.3.2. <i>Etat du sol en place sous un remblai</i>	

2.10.- Perméabilité et consolidation	75
2.10.1. Perméabilité.	75
2.10.2. Principe de la consolidation unidimensionnelle (Théorie de Terzaghi)	77
2.10.3. Limites de la validité de la théorie de Terzaghi	79
2.10.4. Consolidations primaire et secondaire	82
Chapitre 3 - MÉTHODES DE RECONNAISSANCE ET MESURE DES PARAMÈTRES.	85
3.1.- Introduction	85
3.2.- Méthodes de reconnaissance in situ	85
3.2.1. Méthodes géophysiques	85
♦ 3.2.1.1. Méthode de sismique réfraction ♦ 3.2.1.2. Méthode de électrique de résistivité ♦ 3.2.1.3. Diagraphies	
3.2.2. Le pénétromètre statique et le piézocône	88
3.2.3. Le scissomètre de chantier.	89
3.2.4. Méthodes de prélèvement des sols argileux	91
♦ 3.2.4.1. Prélèvement et remaniement ♦ 3.2.4.2. Méthodes de prélèvement des argiles molles ♦ 3.2.4.3. Remarques générales	
3.2.5. Conditions naturelles des eaux souterraines	93
3.2.6. Autres techniques de reconnaissance	94
♦ 3.2.6.1. Estimation de K_0 in situ ♦ 3.2.6.2. L'essai de pénétration standard (ASTM D 1586-67) ♦ 3.2.6.3. L'essai pressiométrique	
3.3.- Essais d'identification en laboratoire	95
3.3.1. Analyse minéralogique	95
3.3.2. Teneur en eau	95
3.3.3. Analyse granulométrique	95
3.3.4. Poids volumiques.	96
♦ 3.3.4.1. Poids volumique γ ♦ 3.3.4.2. Poids volumique des grains solides γ_s	
3.3.5. Limites d'Atterberg	96
♦ 3.3.5.1. Limite de liquidité ♦ 3.3.5.2. Limite de plasti- cité w_p ♦ 3.3.5.3. Indice de plasticité I_p ♦ 3.3.5.4. Indi- ce de ^p liquidité I_L	
3.3.6. Teneur en matières organiques	99
3.3.7. Teneur en carbonate de calcium.	99
3.4.- Mesure en laboratoire des paramètres de résistance	99
3.4.1. Introduction.	99
♦ 3.4.1.1. Résistance de pic et résistance non drainée de l'argile structurée ♦ 3.4.1.2. Résistance de l'argile normalement consolidée (état critique)	
3.4.2. Le scissomètre de laboratoire	101
3.4.3. Le pénétromètre à cône.	101
3.4.4. L'appareil triaxial	102

3.4.5.	Appareil à déformation plane	104
3.4.6.	Appareil de cisaillement direct	105
3.4.7.	Appareil de cisaillement simple	106
3.5.-	Mesure en laboratoire des paramètres de compressibilité.	107
3.5.1.	Introduction.	107
3.5.2.	Appareillage pour la réalisation des essais oedométriques	107
3.5.3.	Essai oedométrique conventionnel.	108
3.5.4.	Essai oedométrique à vitesse de déformation constante (essai CRS)	109
3.5.5.	Essai oedométrique à gradient contrôlé (essai CGT)	109
3.5.6.	Remarques générales	110
3.6.-	Mesure de la perméabilité en place et au laboratoire	111
3.6.1.	Introduction.	111
3.6.2.	Mesure de la perméabilité en laboratoire.	111
♦ 3.6.2.1.	<i>Méthodes de mesure</i> ♦ 3.6.2.2. <i>Essais de perméabilité à l'oedomètre</i> ♦ 3.6.2.3. <i>Anisotropie de perméabilité</i>	
3.6.3.	Mesure de perméabilité en place	113
♦ 3.6.3.1.	<i>Principes des mesures en place de la perméabilité des sols fins</i> ♦ 3.6.3.2. <i>Mesure de la perméabilité dans des piézomètres</i> ♦ 3.6.3.3. <i>Mesure de la perméabilité au perméamètre autoforeur</i>	
3.7.-	Caractéristiques de consolidation.	116
3.8.-	Corrélations entre les propriétés des argiles molles	118
3.8.1.	Principes	118
3.8.2.	Principales corrélations.	118
3.8.3.	Utilisation et limitations.	125
3.9.-	Synthèse géotechnique d'un site.	126
3.9.1.	Profil géotechnique	126
3.9.2.	Coupe géotechnique.	127
Chapitre 4 - COMPORTEMENT DES SOLS DE FONDATION ARGILEUX		129
4.1.-	Généralités.	129
4.2.-	Comportement en cours de construction.	130
4.2.1.	Pressions interstitielles de construction	130
♦ 4.2.1.1.	<i>Consolidation initiale</i> ♦ 4.2.1.2. <i>Passage à l'état limite</i> ♦ 4.2.1.3. <i>Hauteurs de remblais supérieures à la hauteur critique</i> ♦ 4.2.1.4. <i>Cas particulier des argiles fortement surconsolidées</i> ♦ 4.2.1.5. <i>Comportement avant et pendant la rupture</i>	
4.2.2.	Conséquences sur les tassements et les déformations latérales de construction	137
4.2.3.	Conséquences sur la résistance mobilisable à la rupture	140

4.3.-	Comportement après la fin de la construction	143
4.3.1.	Tassements	143
◆ 4.3.1.1.	Amplitude des tassements	
◆ 4.3.1.2.	Vitesse de tassement	
◆ 4.3.1.3.	Tassements secondaires	
4.3.2.	Déplacements latéraux	149
4.4.-	Cas de la construction par étapes	151
4.4.1.	Pressions interstitielles sous le centre du remblai	152
4.4.2.	Stabilité	153
4.4.3.	Déplacements latéraux	154
4.5.-	Cas des remblais construits sur des argiles molles traitées par drains verticaux	156
4.5.1.	Pressions interstitielles	156
4.5.2.	Déformations et stabilité	156
4.5.3.	Consolidation après construction	156
✘ Chapitre 5 -	MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT	157
5.1.-	Principes généraux du dimensionnement	157
5.2.-	Rappel des principes généraux de comportement des fondations argileuses de remblais	158
5.3.-	Analyse de stabilité - Remblai construit en une étape	162
5.3.1.	Rappels	162
5.3.2.	Méthodes d'évaluation de τ_f	163
◆ 5.3.2.1.	Utilisation des essais scissométriques	
◆ 5.3.2.2.	Utilisation des essais oedométriques	
◆ 5.3.2.3.	Utilisation des essais de cisaillement en laboratoire	
5.3.3.	Résistance dans la croûte altérée et le remblai	171
◆ 5.3.3.1.	Résistance de la croûte altérée	
◆ 5.3.3.2.	Résistance du remblai	
5.3.4.	Méthode de calcul du coefficient de sécurité	172
◆ 5.3.4.1.	Abaques de stabilité	
◆ 5.3.4.2.	Calculs sur ordinateur	
◆ 5.3.4.3.	Procédure de calcul	
5.4.-	Analyse de stabilité - Remblai construit en plusieurs étapes	175
5.4.1.	Rappels	175
5.4.2.	Analyse de stabilité - Première étape	177
5.4.3.	Evaluation du gain de résistance par consolidation	178
◆ 5.4.3.1.	Principe	
◆ 5.4.3.2.	Limitations	
5.4.4.	Méthode de calcul	181
5.4.5.	Le calcul en contraintes effectives et ses limitations	181
5.5.-	Calcul des tassements	183
5.5.1.	Rappels	183
5.5.2.	Tassement de construction	184

5.5.3.	Tassements après construction - Amplitude	186
◆ 5.5.3.1.	Tassement de consolidation primaire ◆ 5.5.3.2.	
	Effet de la submergence partielle du sol et du remblai	
◆ 5.5.3.3.	Contribution des déformations de cisaillement	
	au tassement total ◆ 5.5.3.4. Contribution des déforma-	
	tions secondaires au tassement total	
5.5.4.	Tassements après construction - Vitesse	194
◆ 5.5.4.1.	Nature des phénomènes ◆ 5.5.4.2. Analyse numé-	
	rique de la consolidation unidimensionnelle ◆ 5.5.4.3.	
	Solution unidimensionnelle de Terzaghi ◆ 5.5.4.4. Solu-	
	tions bidimensionnelles	
5.5.5.	Cas de la construction par étapes	203
5.6.-	Calcul des déplacements latéraux	204
5.6.1.	Rappels	204
5.6.2.	Déplacements horizontaux en cours de construction .	205
5.6.3.	Déplacements horizontaux après la fin de la cons-	
	truction.	208
5.6.4.	Cas de la construction par étapes	211
Chapitre 6 - ANALYSE NUMÉRIQUE GLOBALE DU COMPORTEMENT		
	DES MASSIFS D'ARGILE.	213
6.1.-	Introduction	213
6.2.-	Le modèle de calcul.	213
6.2.1.	Généralités	213
6.2.2.	Le modèle MELANIE	214
6.2.3.	Rôle de l'eau dans le comportement du massif.	220
6.2.4.	Commentaires.	221
6.3.-	Traitement par la méthode des éléments finis.	221
6.3.1.	Généralités	221
6.3.2.	Traitement de la consolidation des sols élastoplas-	
	tiques dans un programme de calcul par éléments	
	finis	222
6.4.-	Exemples de calcul	226
6.4.1.	Généralités	226
6.4.2.	Exemple de calcul "à la rupture" : le remblai A de	
	Cubzac-les-Ponts (Magnan, 1984 ; Babchia, 1984) . .	226
6.4.3.	Exemple de calcul "de consolidation" : le remblai B	
	de Cubzac-les-Ponts (Magnan, 1984 ; Babchia, 1984). .	233
6.5.-	Conclusion	234
Chapitre 7 - MÉTHODES DE CONSTRUCTION		237
7.1.-	Généralités.	237
7.2.-	Cas courant.	239

7.2.1. Aménagement général du chantier	239
7.2.2. Couches inférieures du remblai.	240
7.2.3. Choix et mise en oeuvre du matériau de remblai.	240
7.3.- Action sur la charge ou sur le temps	241
7.3.1. Construction par étapes	241
7.3.2. Modification de la géométrie du remblai	242
7.3.3. Remblais légers	244
7.3.4. Surcharge temporaire.	247
7.4.- Traitement du sol de fondation	248
7.4.1. Drains verticaux et tranchées drainantes.	248
7.4.2. Colonnes ballastées	254
7.4.3. Colonnes de sol traité à la chaux	255
7.4.4. Remblais sur pieux.	256
7.4.5. Autres méthodes	257
7.5.- Cas particulier des ouvrages de retenue d'eau.	258
Chapitre 8 - INSTRUMENTATION ET UTILISATION DES MESURES	261
8.1.- Généralités.	261
8.2.- Appareils de mesure.	262
8.2.1. Piézomètres	262
♦ 8.2.1.1. Différents types de piézomètres ♦ 8.2.1.2. Mise en place des sondes	
8.2.2. Tassomètres	266
♦ 8.2.2.1. Principaux types de tassomètres ♦ 8.2.2.2. Tassomètres ponctuels de surface et de profondeur ♦ 8.2.2.3. Tassomètres multipoints	
8.2.3. Inclinomètres	271
♦ 8.2.3.1. Principe de mesures inclinométriques ♦ 8.2.3.2. Recommandations ♦ 8.2.3.3. Exploitation des mesures	
8.2.4. Autres appareils de mesure	273
♦ 8.2.4.1. Capteurs de contraintes totales ♦ 8.2.4.2. Profilomètres ♦ 8.2.4.3. Systèmes de mesure des déformations relatives horizontales ♦ 8.2.4.4. Indicateurs de surface de rupture	
8.3.- Plans d'instrumentation.	274
8.3.1. Ouvrages courants	275
8.3.2. Remblais d'essai.	276
8.3.3. Organisation et fréquence des mesures	277
8.4.- Traitement des résultats bruts	278
8.4.1. Principes généraux.	278
8.4.2. Pressions interstitielles	279
8.4.3. Tassements.	281
8.4.4. Déplacements horizontaux	282

8.5.-	Précision des mesures.	282
8.5.1.	Généralités	282
8.5.2.	Pressions interstitielles	283
8.5.3.	Tassements.	283
8.5.4.	Déplacements horizontaux.	284
8.6.-	Interprétation des résultats	284
8.6.1.	Introduction.	284
8.6.2.	Interprétation des mesures faites pendant la construction du remblai	285
♦ 8.6.2.1.	<i>Vérification de la pression de préconsolidation σ'_p</i>	
♦ 8.6.2.2.	<i>Contrôle de la stabilité du remblai</i>	
8.6.3.	Interprétation des mesures faites après la construction du remblai	287
♦ 8.6.3.1.	<i>Analyse des courbes de tassement</i>	
♦ 8.6.3.2.	<i>Analyse des pressions interstitielles mesurées</i>	
♦ 8.6.3.3.	<i>Analyse globale du comportement du sol</i>	
♦ 8.6.3.4.	<i>Contrôle de l'efficacité de drains verticaux</i>	
Chapitre 9 - STRATÉGIE DES ÉTUDES		
9.1.-	Généralités.	291
9.2.-	Stratégie des reconnaissances.	292
9.2.1.	Les étapes de la reconnaissance	292
9.2.2.	L'enquête préliminaire sur les sites et les sols.	293
9.2.3.	La reconnaissance géotechnique sommaire	294
9.2.4.	La reconnaissance géotechnique détaillée.	296
9.2.5.	Le suivi durant la construction et à long terme	297
9.3.-	Critères de dimensionnement.	297
9.3.1.	Evaluation de la stabilité.	298
9.3.2.	Construction du remblai par étapes.	299
9.3.3.	L'analyse des tassements de consolidation	300
9.3.4.	Mesures de protection contre les tassements	301
9.3.5.	Problèmes de déplacements latéraux.	301
9.3.6.	Considérations d'ordre général.	301
9.4.-	Variabilité des propriétés des argiles et méthodes probabilistes	302
9.5.-	Suivi en cours de construction et à long terme	303
9.6.-	Utilisation des remblais d'essai	306
9.6.1.	Justification des remblais d'essai.	306
9.6.2.	Choix du site	307
9.6.3.	Reconnaissance géotechnique du site	307
9.6.4.	Dimensions du remblai d'essai	308
9.6.5.	Instrumentation, construction et suivi	309
9.6.6.	Interprétation et extrapolation au projet réel.	310
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		311