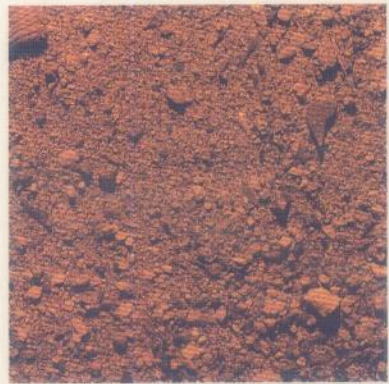


Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Mécanique des sols non saturés



sous la direction de
Olivier Coussy
Jean-Marie Fleureau



22130

hermes

Lavoisier

~~GL 74~~

GL93

Mécanique des sols non saturés

sous la direction de Olivier Coussy et Jean-Marie Fleureau

fait partie de la série GÉOMATÉRIAUX

Mécanique des sols non saturés

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Coussy volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

- Alliages métalliques
- Géomatériaux
- Matériaux de construction
- Méthodes numériques
- Mise en forme des matériaux
- Polymères

sous la direction de

Olivier Coussy

Jean-Marie Fleureau

22 130



22130

Hermès
Science
— publications —

Table des matières

Introduction	17
Olivier COUSSY et Jean-Marie FLEUREAU	
Chapitre 1. L'eau et sa représentation	23
Henri VAN DAMME	
1.1. Introduction	23
1.2. Les composants des sols argileux	25
1.3. Le rôle de l'eau dans les forces entre particules	28
1.3.1. Les contacts frictionnels « secs »	29
1.3.2. Les contacts lubrifiés	29
1.3.3. Les forces capillaires	30
1.3.4. Les forces de Van der Waals	31
1.3.5. Forces répulsives de doubles couches (forces osmotiques)	31
1.3.6. Forces attractives de doubles couches (forces de corrélation)	33
1.3.7. Les forces d'hydratation	34
1.3.8. Quelles forces, à quelle échelle ?	36
1.3.8.1. Les forces entre grains compacts de taille micrométrique ou plus	36
1.3.8.2. Les forces entre feuillets ou entre cristallites d'argiles, à l'échelle nanométrique	36
1.3.8.3. Les forces entre agrégats	37
1.4. La microstructure du système argile-eau	37
1.4.1. Les smectites pures et la structure en réseaux	37
1.4.2. Les argiles plaquettaires et la structure en domaines	42
1.4.3. Les argiles de sol et la texture en grains	42
1.5. Les états de l'eau : eau interfaciale et eau capillaire	43
1.5.1. L'eau interfaciale	44
1.5.2. L'eau capillaire	46
1.5.2.1. La pression capillaire	46

1.5.2.2. L'abaissement de la tension de vapeur	47
1.5.2.3. L'abaissement du point de congélation	49
1.5.2.4. De l'eau capillaire à l'eau interfaciale	49
1.5.2.5. Les effets osmotiques	50
1.6. Localisation de l'eau, gonflement et distribution granulaire	51
1.6.1. L'eau dans les argiles minéralogiquement pures	51
1.6.2. L'eau dans les sols argileux	58
1.7. Conclusion : des états d'équilibre aux états transitoires	62
1.8. Bibliographie	64
Chapitre 2. Bases expérimentales du comportement des sols non saturés	69
Jean-Claude VERBRUGGE et Jean-Marie FLEUREAU	
2.1. Introduction	69
2.1.1. Définitions	69
2.1.2. Méthodes de mesure de la pression capillaire	70
2.1.2.1. Méthodes procédant à une mesure	70
2.1.2.2. Méthodes imposant une valeur fixe	71
2.1.3. Variables d'état	72
2.2. Rôle de la pression capillaire seule : chemins de drainage-imbibition sur une pâte	75
2.2.1. Introduction	75
2.2.2. Description du premier cycle de drainage-imbibition	76
2.2.3. Identification du comportement dans le domaine saturé	77
2.2.4. Influence du matériau sur les paramètres du premier cycle de drainage-imbibition	78
2.3. Influence de la préconsolidation du sol sur les chemins de drainage-imbibition	81
2.3.1. Introduction	81
2.3.2. Chemins de drainage-imbibition sur des sols surconsolidés	81
2.3.3. Chemins de drainage-imbibition sur des sols compactés	83
2.3.4. Exemples de chemins de drainage-imbibition sur des sols naturels	84
2.4. Compression isotrope et œdométrique d'un sol non saturé	87
2.4.1. Introduction	87
2.4.2. Compression mécanique à pression capillaire constante	89
2.4.3. Compression hydrique à contrainte mécanique constante	92
2.5. Comportement des sols soumis à un chargement triaxial axisymétrique	94
2.5.1. Introduction	94
2.5.2. Comportement élastique en petites déformations	95
2.5.3. Comportement en moyennes et grandes déformations	96
2.5.3.1. Comportement drainé	96
2.5.3.2. Comportement non drainé	99
2.6. Les sols quasi secs	100
2.6.1. Généralités	100

2.6.2. Comportement des sols quasi secs	102
2.7. Conclusions	106
2.8. Bibliographie	107

Chapitre 3. Lois de transfert en milieu non saturé. Détermination expérimentale des paramètres

Frédéric SKOCZYLAS et Esam DANA

3.1. Introduction	113
3.2. Mesures de perméabilités relatives	114
3.3. Etudes expérimentales	116
3.3.1. Introduction	116
3.3.2. Matériaux et fluides d'injection utilisés	117
3.3.3. Mesure de la perméabilité relative au gaz – Essai à phase mouillante immobile	120
3.3.3.1. Dispositif expérimental et déroulement de l'essai	120
3.3.3.2. Quelques résultats	122
3.3.4. Essai à injection simultanée des phases mouillante et non mouillante	126
3.3.4.1. Dispositif expérimental et déroulement de l'essai	126
3.3.4.2. Effet Klinkenberg	128
3.3.4.3. Principaux résultats	128
3.4. Conclusion	132
3.5. Bibliographie	134

Chapitre 4. Approche énergétique du comportement des sols non saturés

Olivier COUSSY et Patrick DANGLA

4.1. Introduction	137
4.2. Equations d'état d'un fluide	138
4.2.1. Potentiels thermodynamiques	138
4.2.2. Equation d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur	139
4.3. Bilans d'énergie et d'entropie entre les états d'équilibre du sol non saturé	140
4.3.1. Bilan pour l'élément de sol considéré comme un système ouvert	140
4.3.2. Bilan pour le squelette	142
4.3.3. Hypothèse de variations de volume négligeables du constituant solide	143
4.4. Equations d'état de la poroélasticité	145
4.5. Courbe de pression capillaire	145
4.5.1. Courbe de pression capillaire en transformation isotherme	145
4.5.2. Courbe de pression capillaire en transformation non isotherme	147
4.5.3. Courbe de pression capillaire et isotherme de sorption	149
4.5.4. Hystérésis	150
4.5.4.1. Approche énergétique de l'hystérésis	150

4.5.4.2. Identification de l'énergie $U(S_l)$ par une analyse à l'échelle microscopique pour une géométrie particulière de l'espace poreux et dans l'hypothèse d'un angle de contact nul	153
4.6. Poroélasticité et courbe de pression capillaire	157
4.6.1. Hypothèse de séparation des énergies et loi de comportement thermoporoélastique	157
4.6.2. La pression interstitielle équivalente	159
4.6.2.1. Pression interstitielle équivalente et contrainte effective	159
4.6.2.2. Pression interstitielle équivalente π et données expérimentales	161
4.7. Approche énergétique, approche micro-macro et hystérésis	164
4.7.1. Pression interstitielle π et approches micro-macro	164
4.7.2. Prise en compte de la déformation dans l'énergie libre des interfaces	167
4.7.3. Courbes de pression capillaire en milieu déformable	168
4.7.4. Hystérésis en milieu déformable	169
4.8. Conclusion	172
4.9. Bibliographie	173
Chapitre 5. Homogénéisation pour les milieux poreux non saturés	175
Xavier CHATEAU et Luc DORMIEUX	
5.1. Introduction	175
5.2. Modélisation mécanique à l'échelle locale	176
5.3. Lois de transport des fluides – Homogénéisation périodique	178
5.3.1. Modélisation à l'échelle locale	179
5.3.2. Adimensionnalisation et normalisation des équations	180
5.3.3. Procédure d'homogénéisation	183
5.3.4. Résolution du problème d'homogénéisation	184
5.3.4.1. Problèmes d'ordre (0) pour les fluides	185
5.3.4.2. Problème d'ordre (0) pour l'interface	185
5.3.4.3. Problèmes d'ordre (1) pour les fluides	187
5.3.5. Lois de transport macroscopiques pour les fluides	188
5.3.6. Conclusion partielle	192
5.4. Comportement mécanique – Approche micromécanique	192
5.4.1. Modélisation à l'échelle locale	193
5.4.2. Normalisation des équations	193
5.4.3. Lemme de Hill	195
5.4.4. Aspects morphologiques	196
5.4.5. Un modèle simplifié	198
5.4.6. Prise en compte des interfaces	200
5.4.6.1. Aspect mécanique	200
5.4.6.2. Aspect capillaire	202
5.4.7. Conclusion partielle	204

5.5. Critère de résistance – Homogénéisation en calcul à la rupture	205
5.5.1. Lemme de Hill	205
5.5.2. Domaine de résistance macroscopique	206
5.5.3. Un exemple bidimensionnel	208
5.5.3.1. Approche statique par l'intérieur	210
5.5.3.2. Approche cinématique	211
5.5.4. Milieu granulaire	214
5.5.4.1. Empilement cubique	218
5.5.4.2. Un matériau effondrable	221
5.6. Conclusions	227
5.7. Bibliographie	228

Chapitre 6. Plasticité et hystérésis 231

Patrick DANGLA

6.1. Introduction	231
6.2. Modélisation de l'hystérésis	234
6.2.1. Formulation du modèle macroscopique	234
6.2.2. Interprétation physique	238
6.3. Le modèle élastoplastique d'Alonso, Gens et Josa	239
6.3.1. Comportement sous chargement isotrope	239
6.3.2. Comportement sous chargement triaxial	244
6.3.3. Formulation tridimensionnelle	247
6.3.4. Lien avec l'approche énergétique et courbe capillaire	248
6.4. Approche énergétique de l'élastoplasticité des sols non saturés	251
6.4.1. Hypothèses de séparation des énergies et de découplage des dissipations d'origine plastique et hystérétique	251
6.4.2. Pression interstitielle équivalente π et modélisation élastoplastique	254
6.4.2.1. Rupture des sols non saturés	255
6.4.2.2. Comportement volumique sur des chemins de contraintes isotropes	256
6.4.2.3. Comportement volumique sur des chemins d'imbibition-drainage	262
6.4.2.4. Formulation du comportement sur des trajets de chargement isotrope quelconques	265
6.4.2.5. Comportement au triaxial	268
6.4.2.6. Formulation tridimensionnelle du modèle	270
6.5. Conclusion	271
6.6. Bibliographie	271

Chapitre 7. Barrages et remblais 275

Arézou MODARESSI et Jean-Jacques FRY

7.1. Introduction	275
7.2. Modélisation des milieux non saturés	277

7.2.1. Définition des contraintes dans un sol non saturé	279
7.2.2. Modélisation de l'écoulement dans un milieu non saturé	281
7.2.3. Rappel des équations de bilan	282
7.2.3.1. Conservation de la quantité de mouvement	282
7.2.3.2. Conservation de la masse	283
7.2.3.3. Système d'équations retenu	285
7.2.4. Conditions aux limites	285
7.2.4.1. Conditions aux limites mécaniques	286
7.2.4.2. Conditions aux limites hydrauliques	288
7.2.5. Conditions initiales	292
7.2.6. Cas particuliers	293
7.2.7. Formulation faible	294
7.2.8. Modélisation des domaines évolutifs	295
7.2.8.1. Paramétrage du chargement	295
7.2.8.2. Paramétrage lagrangien de la géométrie	296
7.2.9. Discrétisation	298
7.2.9.1. Discrétisation en espace	298
7.2.9.2. Discrétisation en temps	300
7.2.10. Résolution du système non linéaire	301
7.2.10.1. Choix de la discrétisation spatiale	301
7.2.10.2. Choix de la discrétisation temporelle	302
7.3. Modèles constitutifs	302
7.3.1. Modèles d'élasticité non linéaire pseudo-saturé	302
7.3.2. Modèles d'élasticité non linéaire avec surfaces d'état	303
7.3.3. Modèles élastoplastiques	303
7.3.4. Comportement mécanique	304
7.3.5. Comportement hydraulique	308
7.3.6. Identification des paramètres	312
7.4. Considérations pratiques	314
7.4.1. Le compactage	315
7.4.2. La construction	319
7.4.2.1. La méthode de l'USBR (dite méthode de Hilf)	319
7.4.2.2. La méthode de Bishop	321
7.4.3. La mise en eau	323
7.4.4. La vidange	326
7.4.5. Evaluation de la stabilité	329
7.4.5.1. Analyse de la construction	329
7.4.5.2. Analyse de la mise en eau	331
7.4.5.3. Analyse de la vidange	331
7.5. Etude du barrage de La Ganne	333
7.6. Conclusions	339
7.7. Bibliographie	341

Chapitre 8. Barrières ouvragées de stockage des déchets nucléaires 349

Thierry LASSABATÈRE

8.1. Problématique générale du stockage géologique des déchets nucléaires	349
8.2. Les dimensions caractéristiques du problème	351
8.2.1. L'échelle d'espace : le champ proche	351
8.2.2. L'échelle de temps : la durée de la resaturation	352
8.3. Modèles isothermes de transport en milieu non saturé	353
8.3.1. Modèle de Richards d'écoulement d'eau liquide à pression de gaz constante	353
8.3.2. Ecoulement d'eau avec changement de phase	355
8.3.3. Un modèle complet et général d'écoulements diphasique	358
8.3.4. Validité du modèle de Richards pour la prédiction de la resaturation isotherme du stockage	359
8.4. Application du modèle de Richards à la resaturation isotherme d'une barrière ouvragée (BO) de stockage	359
8.4.1. Schéma générique d'un tunnel/puits de stockage. Conditions aux limites	359
8.4.2. Etude paramétrique du temps de resaturation isotherme d'une barrière ouvragée	361
8.4.3. Interaction resaturation-corrosion	364
8.5. Modélisation de l'interaction entre resaturation et phase thermique	368
8.5.1. Le couplage thermohydraulique	368
8.5.1.1. Les lois thermiques	368
8.5.1.2. L'influence de la température sur les lois hydrauliques	369
8.5.2. Simulation de la resaturation en température de la BO	370
8.5.2.1. Propriétés des matériaux	370
8.5.2.2. Conditions aux limites	370
8.5.2.3. Résultats	371
8.6. Prise en compte des couplages hydromécaniques : contraintes de gonflement dues à la resaturation	373
8.6.1. Prédiction de la pression de gonflement des argiles compactées	374
8.6.2. Contraintes, déformations et déplacements au sein d'une barrière ouvragée de stockage	376
8.6.2.1. Géométrie, conditions initiales et aux limites	376
8.6.2.2. Principe de résolution par la méthode des déplacements	377
8.6.2.3. Expression des champs solutions	379
8.7. Conclusion et perspectives	383
8.8. Bibliographie	384

GÉOMATÉRIAUX

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

- Alliages métalliques
- Géomatériaux
- Matériaux de construction
- Méthodes numériques
- Mise en forme des matériaux
- Polymères

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

