

Collection Génie Civil

Géostructures énergétiques

Lyesse Laloui
Alice Di Donna

hermes

Lavoisier

Table des matières

Préface	15
Lyesse LALOUI et Alice DI DONNA	
PREMIÈRE PARTIE. MODÉLISATION PHYSIQUE DE PIEUX ÉNERGÉTIQUES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES	17
Chapitre 1. Réponse des sols aux conditions thermomécaniques imposées par les géostructures énergétiques.	19
Alice DI DONNA et Lyesse LALOUI	
1.1. Introduction.	20
1.2. Comportement thermomécanique des sols	21
1.2.1. Comportement thermomécanique des argiles	22
1.3. Modélisation constitutive du comportement thermomécanique des sols	29
1.3.1. Le modèle ACMEG-T	29
1.3.1.1. Analyses numériques avec le modèle ACMEG-T	34
1.4. Remerciements.	37
1.5. Bibliographie.	37
Chapitre 2. Tests <i>in situ</i> grandeur nature de pieux énergétiques.	41
Lyesse LALOUI et Thomas MIMOUNI	
2.1. Observation de la réponse thermomécanique des pieux énergétiques	41
2.1.1. Mesures de déformation et de température	41

2.1.2. Mesure de la compression en base de pieu	45
2.1.3. Observation du comportement du sol	46
2.2. Description des deux sites expérimentaux du campus de l'EPFL	47
2.2.1. Pieu test isolé	47
2.2.2. Groupe de pieux expérimental	49
2.2.3. Protocole de test.	51
2.2.3.1. Chargement mécanique	51
2.2.3.2. Chargement thermique	53
2.3. Réponse thermomécanique des pieux énergétiques	55
2.3.1. Méthode générale	55
2.3.2. Réponse thermomécanique du pieu isolé	56
2.3.3. Réponse thermomécanique d'un groupe de pieux énergétiques	57
2.4. Conclusion	59
2.5. Bibliographie	60

Chapitre 3. Performances observées des géostructures énergétiques 63
 Peter BOURNE-WEBB

3.1. Présentation des sources d'observations	63
3.2. Stockage et captage thermique	65
3.2.1. Présentation d'ensemble	65
3.2.2. Taux d'injection/extraction d'énergie	66
3.2.2.1. Pieux énergétiques	66
3.2.2.2. Autres géostructures énergétiques	70
3.2.3. Champs thermiques	71
3.2.3.1. Températures internes des pieux	72
3.2.3.2. Températures du sol autour des pieux isolés	73
3.2.3.3. Températures du sol autour de groupes de pieux	76
3.2.3.4. Autres géostructures énergétiques	77
3.3. Effets thermomécaniques	78
3.3.1. Présentation d'ensemble	78
3.3.2. Effets structurels	78
3.3.3. Interactions sol-structure	83
3.4. Conclusion	85
3.5. Remerciements	87
3.6. Annexe	87
3.7. Bibliographie	96

Chapitre 4. Etude du comportement des pieux échangeurs de chaleur par modélisation physique 99
 (Hosni) HASSIN, Jean-Michel PEREIRA, Anh Minh TANG et Neda YAVARI

4.1. Introduction	99
4.2. Modélisation physique des pieux de fondations	100
4.2.1. Dispositifs expérimentaux	100
4.2.2. Système de chargement mécanique	101
4.2.3. Suivi des mesures	102
4.2.4. Comportement du pieu	103
4.3. Modélisation physique d'un pieu échangeur de chaleur	103
4.3.1. Dispositif expérimental	103
4.3.2. Comportement mécanique d'un pieu sous chargement thermomécanique	105
4.3.3. Transfert de chaleur	110
4.3.4. Interface sol-pieu	111
4.3.5. Enseignement tiré de la modélisation physique d'un pieu échangeur de chaleur	111
4.4. Conclusion	114
4.5. Remerciements	115
4.6. Bibliographie	115

Chapitre 5. Modélisation en centrifugeuse de fondations énergétiques 119
 John Scott MCCARTNEY

5.1. Introduction	119
5.2. Informations de base concernant l'interaction thermomécanique entre le sol et la structure	120
5.3. Concepts de modélisation en centrifugeuse	121
5.4. Composants de modélisation en centrifugeuse	122
5.4.1. Fabrication et caractérisation d'un modèle en centrifugeuse	122
5.4.2. Installation expérimentale	124
5.5. Tests de modélisation en centrifugeuse pour fondations semi-flottantes	127
5.5.1. Analyses du sol	127
5.5.2. Fondation A : essais de chargement isotherme jusqu'à la rupture	128
5.5.3. Fondation B : représentation des contraintes-déformations thermomécaniques	132
5.6. Conclusion	136
5.7. Remerciements	137
5.8. Bibliographie	137

DEUXIÈME PARTIE. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES GÉOSTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES 139

Chapitre 6. Utilisations alternatives des géostructures énergétiques 141
 Fabrice DUPRAY, Lyesse LALOUI et Thomas MIMOUNI

6.1. Fondations compactes et disperses pour le déverglaçage des ponts 142
 6.1.1. Besoins en chaleur et spécificités des petites fondations 143
 6.1.1.1. Besoins hivernaux 143
 6.1.1.2. Possibilité de récupération d'énergie solaire 144
 6.1.1.3. Présence possible d'un écoulement souterrain 144
 6.1.2. Modélisation du pieu 145
 6.1.2.1. Contexte géotechnique 145
 6.1.2.2. Géométrie du modèle 145
 6.1.2.3. Caractéristiques du modèle 146
 6.1.2.4. Chemins de chargement 147
 6.1.3. Résultats et analyse 148
 6.1.3.1. Cas de base : faible écoulement avec stockage d'énergie solaire 148
 6.1.3.2. Cas 2 : faible écoulement avec recharge naturelle 149
 6.1.3.3. Cas 3 : pas d'écoulement et stockage d'énergie solaire 151
 6.1.3.4. Cas 4 : fort écoulement avec recharge naturelle 153
 6.1.3.5. Usage pour le déverglaçage 154
 6.2. Ancrages échangeurs de chaleur 154
 6.2.1. Aspects techniques et usagers possibles 155
 6.2.2. Méthode d'étude 155
 6.2.3. Optimiser la production de chaleur 157
 6.2.4. Implications mécaniques liées à la production de chaleur 158
 6.3. Conclusion 160
 6.4. Remerciements 160
 6.5. Bibliographie 161

Chapitre 7. Analyse numérique de la capacité portante des pieux thermo-actifs sous sollicitations axiales cycliques 163
 Sébastien BURLON, Julien HABERT, Hussein MROUHE et Maria E. SURYATRIVASTUTI

7.1. Introduction 163
 7.2. Capacité portante d'un pieu sous une charge thermique supplémentaire 164
 7.3. Loi constitutive d'interface sol-pieu sous chargement cyclique : la loi Modjoïn 167

7.4. Analyse numérique d'un pieu thermo-actif sous chargement cyclique thermique 170
 7.4.1. Réaction par rapport à la structure supérieure 172
 7.4.2. Effort normal dans le pieu 173
 7.4.3. Frottements axiaux mobilisés à l'interface sol-pieu 173
 7.5. Recommandation concernant les pieux thermo-actifs à échelle réelle 175
 7.5.1. Effet de différents taux de chargement pour la charge mécanique appliquée 175
 7.5.2. Effet des pieux thermo-actifs sur une fondation en radier pour pieux 176
 7.6. Conclusion 178
 7.7. Remerciements 179
 7.8. Bibliographie 179

Chapitre 8. Géostructures énergétiques en sols non saturés 181
 Mahed AL-SHURUF, Charles J.R. COCCIA, John Scott MCCARTNEY et Melissa A. STEWART

8.1. Introduction 181
 8.2. Écoulement d'eau induit thermiquement 183
 8.3. Variation volumique d'un sol non saturé drainé thermiquement 185
 8.4. Effets de la température sur la résistance et la rigidité du sol 187
 8.5. Effets de la température sur les propriétés hydrauliques des sols non saturés 189
 8.6. Effets de la température sur l'interaction sol-géosynthétiques 190
 8.7. Conclusion 192
 8.8. Remerciements 193
 8.9. Bibliographie 193

Chapitre 9. Géostructures énergétiques comme système de refroidissement dans les climats chauds 201
 Ghassan ANIS AKROUCH, Jean-Louis BRIAUD et Marcelo SANCHEZ

9.1. Introduction 201
 9.2. Facteurs climatiques et effets sur les conditions et les propriétés du sol 202
 9.3. Propriétés thermiques et transfert de chaleur des sols saturés et non saturés 204
 9.4. Effets des conditions du sol sur la performance des géostructures énergétiques 205

9.4.1. Conception expérimentale en laboratoire 206
 9.4.2. Modélisation numérique 207
 9.4.3. Tests en laboratoire et résultats numériques 210
 9.4.4. Modélisation du pieu complet. 213
 9.5. Tests grandeur nature de pieux énergétiques 215
 9.6. Conclusion 217
 9.7. Remerciements 218
 9.8. Bibliographie 218

Chapitre 10. Impact de la diffusion thermique transitoire

dans un sol autour d'un pieu thermo-actif 221
 Sébastien BURLON, Hussein MROUEH et Maria E. SURYATRIVASTUTI

10.1. Introduction 221
 10.2. Phénomène de transfert de chaleur 222
 10.2.1. Propriétés du sol 223
 10.2.1.1. Température du sol 223
 10.2.1.2. Écoulement d'eau souterrain 224
 10.2.2. Conservation d'énergie en régime transitoire 224
 10.3. Modélisation numérique de la diffusion thermique dans un pieu thermo-actif 225
 10.3.1. Modèle en deux dimensions – Diffusion à l'intérieur du pieu thermo-actif 227
 10.3.1.1. Effets de la configuration des tubes absorbteurs 228
 10.3.1.2. Effets de différentes températures d'admission 229
 10.3.2. Modèle en trois dimensions – Diffusion vers le sol entourant le pieu 231
 10.4. Impact du fonctionnement thermique à long terme 231
 10.4.1. Effets de l'écoulement d'eau souterrain sur la diffusion thermique 231
 10.4.2. Longévité mécanique sous contrainte thermique cyclique 234
 10.5. Conclusion 236
 10.6. Remerciements 237
 10.7. Bibliographie 237

Chapitre 11. Systèmes géothermiques de dégivrage des tabliers de ponts basés sur les fondations énergétiques

G. Allen BOWERS et C. Guney OLGUN 239

11.1. Introduction 239
 11.2. Chauffage géothermique des tabliers de ponts 241

11.3. Processus thermiques et évaluation de la demande en énergie des systèmes géothermiques de dégivrage 243
 11.4. Modélisation numérique et résultats d'analyse 245
 11.5. Conclusion 253
 11.6. Remerciements 254
 11.7. Bibliographie 254

INDEX PARTIE PRATIQUES EN INGÉNIERIE 257

Chapitre 12. Mise en place des géostructures énergétiques 259

Peter HERRMANN-WIRTH

12.1. Introduction 259
 12.2. Planification et conception 260
 12.2.1. Coordination et communication 260
 12.2.2. Gestion de la conception 261
 12.2.3. Passage en revue de la conception du système 262
 12.2.4. Compétences et compétences 265
 12.3. Construction 267
 12.3.1. Contrôle de la qualité du processus 267
 12.3.2. Détails d'installation 268
 12.3.2.1. Fondations des pieux 268
 12.3.2.2. Parois moulées 280
 12.3.2.3. Plongée, remontées, pénétrations et imperméabilisation 287
 12.3.2.4. Fondations et radiers peu profonds 287
 12.3.2.5. Revêtements de tunnels 288
 12.4. Intégration et exploitation du système 295
 12.5. Conclusion 296
 12.6. Remerciements 298
 12.7. Bibliographie 298

Chapitre 13. Thermo-Pile : un outil numérique pour la conception des pieux énergétiques 301

Lyesse FAICOU et Thomas MINOUNI

13.1. Hypothèses fondamentales 301
 13.2. Formulation mathématique et implémentation numérique 302
 13.2.1. Les courbes de transfert de charge 302
 13.2.1.1. Forme des courbes de transfert de charge 302
 13.2.1.2. Capacités portantes ultimes 303

13.2.2. Déplacements induits par la charge mécanique	304
13.2.3. Déplacements induits par la charge thermique	306
13.2.3.1. Cas sans chargement mécanique	306
13.2.3.2. Cas avec chargement mécanique	307
13.3. Validation de la méthode	307
13.4. Longrine sur pieux énergétiques	308
13.4.1. Méthode générale	308
13.4.2. Détermination des constantes d'intégration	312
13.4.3. Exemple de simulation	313
13.5. Conclusion	314
13.6. Remerciements	315
13.7. Bibliographie	315
Chapitre 14. Etude de cas : Dock Midfield, terminal de l'aéroport de Zürich	317
Daniel PAHUD	
14.1. Dock Midfield	317
14.2. Processus de dimensionnement de l'installation avec pieux énergétiques	318
14.2.1. Concept de l'installation avec pieux	318
14.2.2. Problèmes à résoudre	319
14.2.3. Premières étapes de l'évaluation	320
14.2.4. Deuxièmes étapes de l'évaluation	322
14.2.5. Troisièmes étapes de l'évaluation	324
14.2.6. Simulations finales avec le programme TRNSYS	325
14.3. Le programme PILESIM	326
14.4. Schéma de principe de l'installation et points de mesure	327
14.5. Performances thermiques mesurées du système	328
14.6. Optimisation et intégration du système	331
14.7. Conclusion	332
14.8. Remerciements	333
14.9. Bibliographie	333
Index	335

Le développement des géostructures énergétiques connaît, depuis une dizaine d'années, une croissance exceptionnelle dans le monde entier. Cette nouvelle technologie représente une source d'énergie propre et renouvelable qui peut être utilisée à la fois pour chauffer et refroidir les bâtiments et les infrastructures. En se basant sur le principe de la géothermie de surface, elle couple le rôle structurel primordial des géostructures avec les besoins en énergie.

Cet ouvrage dresse un panorama des technologies en matière de géostructures énergétiques. Il étudie tout d'abord le comportement des pieux échangeurs à travers la modélisation physique à différentes échelles, puis traite de la modélisation numérique de différents types de géostructures énergétiques. Enfin, il considère les aspects liés à l'implémentation de cette nouvelle technologie dans le processus de conception. Ce livre rassemble les connaissances actuelles, en considérant à la fois les aspects énergétiques, les défis géotechniques, les méthodes de dimensionnement et les stratégies adoptées par les ingénieurs pour appréhender ces innovations technologiques.

Les coordonnateurs

Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lyesse Laloui est directeur du laboratoire de mécanique des sols et de la section de génie civil.

Chercheur au laboratoire de mécanique des sols à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Alice Di Donna mène des activités de recherche dans le domaine de la thermomécanique.

hermes
Science
— publications —

www.editions.lavoisier.fr

