

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. Ecoulement 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
Chassan 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 absorbants 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

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 HERRING, WIMM

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

