
Collection Génie Civil

Géostructures énergétiques

Lyesse Laloui
Alice Di Donna

 hermes

Lavoisier

Géostrucures énergétiques

© 2014, Lavoisier, Paris

www.editions.lavoisier.fr

ISBN 978-2-7462-4577-8

ISSN 1771-9011

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

Géostructures énergétiques

Lyesse Laloui
Alice Di Donna

hermes
Science
—publications—

Lavoisier

Direction éditoriale – Gilles PIJAUDIER-CABOT

Liste des auteurs et des contributeurs

Ghassan ANIS AKROUCH
Texas A&M University
College Station
Etats-Unis

Nahed ALSHERIF
University of Colorado
Boulder
Etats-Unis

Tony AMIS
GI Energy Ltd.
Coventry
Royaume-Uni

Jean-Baptiste BERNARD
ECOME Ingénierie
Paris

Peter BOURNE-WEBB
Instituto Superior Técnico
Lisbonne
Portugal

G. Allen BOWERS
VirginiaTech
Blacksburg
Etats-Unis

Jean-Louis BRIAUD
Texas A&M University
College Station
Etats-Unis

Sébastien BURLON
IFSTTAR
Marne-la-Vallée

Charles J.R. COCCIA
University of Colorado
Boulder
Etats-Unis

Alice DI DONNA
EPFL
Lausanne
Suisse

Fabrice DUPRAY
EPFL
Lausanne
Suisse

Wolf FRIEDEMANN
Ed Züblin AG
Stuttgart
Allemagne

Julien HABERT
CETE Nord
Haubourdin

Ghazi HASSEN
Ecole des Ponts ParisTech
Marne-la-Vallée

Lyesse LALOU
EPFL
Lausanne
Suisse

John Scott MCCARTNEY
University of Colorado
Boulder
Etats-Unis

Thomas MIMOUNI
EPFL
Lausanne
Suisse

Hussein MROUEH
LGCgE
Université de Lille
Villeneuve d'Ascq

C. Guney OLGUN
VirginiaTech
Blacksburg
Etats-Unis

Daniel PAHUD
University of Applied Sciences
and Arts of Southern Switzerland
Canobbio
Suisse

Jean-Michel PEREIRA
Ecole des Ponts ParisTech
Marne-la-Vallée

Norbert PRALLE
Ed Züblin AG
Stuttgart
Allemagne

Marcelo SANCHEZ
Texas A&M University
Blacksburg
Etats-Unis

Melissa A. STEWART
University of Colorado
Boulder
Etats-Unis

Maria E. SURYATRIYASTUTI
LGCgE
Université de Lille
Villeneuve d'Ascq

Anh Minh TANG
Ecole des Ponts ParisTech
Marne-la-Vallée

Veli Matti UOTINEN
Ruukki
Finlande

Nico VON DER HUDE
Consultant IB NvdH
Darmstadt
Allemagne

Bernhard WIDERIN
Enercret GmbH
Röthis
Autriche

Neda YAVARI
Ecole des Ponts ParisTech
Marne-la-Vallée

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
Ghazi HASSEN, 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 LALOUÏ 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 MROUEH
et Maria E. SURYATRIYASTUTI

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 Modjoin	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 par pieux	176
7.6. Conclusion	178
7.7. Remerciements.	179
7.8. Bibliographie.	179
Chapitre 8. Géostrucures énergétiques en sols non saturés	181
Nahed ALSHERIF, 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. Géostrucures 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 géostrucures 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. SURYATRIYASTUTI	
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. Ecoulement d'eau souterraine	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 absorbeurs	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 souterraine 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	239
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
TROISIÈME PARTIE. PRATIQUES EN INGÉNIERIE	257
Chapitre 12. Mise en place des géostructures énergétiques	259
Peter BOURNE-WEBB	
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. Connaissances 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 LALOU et Thomas MIMOUNI	
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

Préface

Les géostructures énergétiques sont en pleine expansion dans le monde entier. Elles représentent une source d'énergie propre et renouvelable qui peut être utilisée pour le chauffage et la climatisation des bâtiments ainsi que pour le contrôle de la température des infrastructures. Cette technologie associe le rôle structurel des géostructures à l'approvisionnement énergétique, en utilisant le principe de la géothermie peu profonde. D'une part, en hiver, la chaleur est extraite du sol afin de satisfaire les besoins en chauffage et d'autre part, en été, la chaleur est injectée dans le sol afin de satisfaire les besoins en refroidissement.

Le double rôle de ces structures rend leur conception particulièrement difficile et plus complexe que pour les projets plus conventionnels. Outre les procédures connues couramment appliquées à la mise en place d'une géostructure, plusieurs autres problèmes se posent lorsque l'on décide de l'exploiter du point de vue de l'approvisionnement d'énergie. Ces problèmes incluent notamment la conception et le dimensionnement de l'équipement géothermique, l'étude de la demande en énergie et l'optimisation du système qui en résulte, la considération des autres effets provoqués par la variation de température, sur la structure elle-même en termes de contraintes et de déplacements, et la définition des responsabilités des différents professionnels impliqués dans le projet. Comme les géostructures énergétiques constituent une nouvelle technologie en ingénierie, il est nécessaire d'approfondir les connaissances scientifiques à leur sujet et de définir des procédures de conception et de dimensionnement.

Le but de cet ouvrage est de donner aux lecteurs une présentation exhaustive des connaissances possédées à ce jour concernant ces structures, et des procédures actuellement appliquées dans les régions où elles ont été mises en pratique. Ce livre est divisé en trois parties, chacune étant composée de chapitres écrits par les meilleurs ingénieurs et chercheurs dans ce domaine. La première partie traite de la

modélisation physique des géostructures énergétiques ; elle comprend des recherches en laboratoire sur le comportement thermomécanique des sols, des analyses *in situ*, des essais en centrifugeuse et des expériences à petite échelle. La deuxième partie comprend les résultats de simulations numériques de pieux énergétiques, de tunnels et de fondations de ponts, tout en examinant également la mise en pratique de telles structures dans différentes zones climatiques. La troisième partie traite des aspects pratiques d'ingénierie, depuis la mise en place des géostructures énergétiques jusqu'au développement d'outils de conception pour leur dimensionnement géotechnique. Enfin, cet ouvrage se conclut avec l'étude d'un cas réel.

Les éditeurs tiennent à remercier tous les auteurs pour leurs contributions innovantes.

Lyesse LALOU
Alice DI DONNA

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.