



Association régie par la loi
du 1.07.1901

Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique

COMPTE RENDU DE LA REUNION DE LA COMMISSION TECHNIQUE DU MERCREDI 22 JANVIER 2014

Participants :

Nom	Prénom	adresse e-mail	téléphone	Présent	Excusé	Absent
BRIANÇON	Laurent	laurent.briancon@anteagroup.com	06 10 82 63 11	X		
BRULE	Stéphane	stephane.brule@menard-mail.com	06 22 92 23 86		X	
CARPINTEIRO	Luis	luis.carpinteiro@socotec.com	06 82 24 87 13	X		
DEMARY	Bruno	b.demay@bouygues-construction.com	06 60 07 34 10	X		
FAVRE	Marc	marc.favre@geos.fr	04 50 95 38 14	X		
GLANDY	Michel	michel.glandy@soletanche-bachy.com	06 77 03 57 25		X	
GUERPILLON	Yves	yves.guerpillon@egis.fr	06 11 14 49 37	X		
LAMBERT	Serge	serge.lambert@keller-france.com	06 85 20 56 70	X		
LE BISSONNAIS	Hervé	h.lebissonnais@terrasol.com	06 76 71 38 59		X	
PAL	Olivier	olivier.pal@eiffage.com	06 07 46 14 06	X		
POILPRE	Christophe	geotechnique@x-am-sol.com	06 80 90 41 37	X		
POZZI	Nathalie	nathalie.pozzi@demathieu-bard.fr	07 77 69 51 72	X		
SEMBLAT	Jean-François	jean-francois.semblat@ifsttar.fr	06 88 80 91 16	X		
VOLCKE	Jean-Paul	jp.volcke@franki.fayat.com	06 89 99 32 44	X		
ZERHOUNI	Moulay	moulay.zerhouni@arcadis-fr.com	06 16 98 01 32	X		

Ordre du jour :

1. Information sur la réunion du conseil du 10 Décembre 2013
2. Prochaines séances techniques
3. 16^e Congrès Européen ECSMGE à Edinbourg en Septembre 2015
4. Géostructures énergétiques (pièce jointe)
5. Point activité des différents groupes de travail
6. Points divers

1. Bref compte-rendu de la réunion du conseil du 10 décembre 2013

Fait d'après les notes prises en réunion par le vice-président de la Commission H. Le BISSONNAIS.

- Bilan financier du congrès paris 2013 : bilan positif (de l'ordre de 150 k€, pour un budget de 1,5 millions d'Euros)
- Exposition virtuelle « les dessous des grands travaux » : commande effectuée pour mise en ligne sur le Web
- Livre sur la géotechnique : avancement un peu laborieux : toujours une volonté de parution pour JNGG 2014
- JNGG 2014 : Séance plénière présidée par A. GUILLOUX, thème à définir
- Prix KERISEL : pas de candidature au 10/12/2013 : appel à candidature à relancer ?
- RFG : F. MASROURI reprend la responsabilité du comité de rédaction, **nécessité de designer un correspondant à la commission technique,** *les volontaires sont M.FAVRE, N.POZZI, JF.SEMBLAT*
- Francophonie : **création d'un groupe de travail pour la mise à jour du guide technique sur la conception des routes en Afrique (ancien guide BCEOM/CEBTP) : un participant à désigner à la CT,** *les volontaires sont Y.GUERPILLON, O. PAL, C.POILPRE*
- Conférence Coulomb 2014 : Francis BLONDEAU retenu (avec demande de publication d'un article dans la RFG)
- Il est demandé à la Commission de faire le point de tous les représentants français des Technical committees de la ISSMGE

2. Prochaines séances techniques

- La demi-journée de « restitution des travaux ECOH », en partenariat avec CFMR, et prévue le 22 janvier 2014 a été reportée à une date ultérieure compte-tenu de l'indisponibilité à la date prévue de certains intervenants.
- **Le 26 Mars 2014** « Battage et Vibro-fonçage » : organisation : B. DEMAY et C. JACQUARD. Note post- réunion : le programme a été diffusé fin février, il contient 12 exposés portant aussi bien sur la théorie du battage et du vibro-fonçage que sur les retours d'expérience chantiers ou les questions de matériel et d'environnement
- **Le 21 Mai 2014** : « géostructures énergétiques », organisateurs : Y.GUERPILLON, JP. VOLCKE, N. POZZI, S. LAMBERT et L.CARPINTEIRO. Pilote : Luis CARPINTEIRO.
- **REX ASIRI** : reportée au 3eme/ 4eme trimestre 2014. Organisateurs L. CARPINTEIRO, S. LAMBERT avec l'aide d'O.COMBARIEU

Autres thèmes évoqués :

- Réhabilitation et confortement des ouvrages existants, reprise en sous-œuvre. L.CARPINTEIRO fournit des informations sur le site www.strres.org.
- Les enjeux et les métiers de l'enseignement de la géotechnique (volontaires : Y.GUERPILLON, M.ZERHOUNI et L.BRIANCON)
- Retour de l'application de la nouvelle version de la norme NF P 94-500
- La géotechnique et les normes (volontaires :JP. VOLCKE, M.ZERHOUNI) CNREG, Essais sur ouvrage, cadre d'application des normes
- Géotechnique et travaux souterrains (2015, en fonction avancement des études et travaux du Grand Paris)

3. 16^e Congrès Européen ECSMGE à Edimbourg en Septembre 2015

Les membres de la commission technique seront sollicités pour la relecture des résumés des articles du 16^e congrès européen qui aura lieu à Edimbourg du 13 au 17 septembre 2015.

Le correspondant français des organisateurs de la conférence est F. MASROURI.

4. Autres manifestations, francophones

- Conférence d'Ingénierie géotechnique Maghrébine en Tunisie
- Maroc = ?
- Algérie : pas d'instance officielle pour le moment, en cours de création, ce qui permettrait d'envisager des manifestations communes comme par exemple une journée technique Franco-Algérienne (A suivre)

5. Géostructures énergétiques

Il est proposé la création d'un groupe de travail sur les géostructures énergétiques, associant SYNTEC-INGENIERIE et le CFMS. Il est demandé aux membres de la commission technique de participer à ce groupe de travail.

Le document établi par SYNTEC-INGENIERIE et présentant le projet est joint en annexe.

6. Point sur l'activité des différents groupe de travail impliquant les membres de la commission techniques

GT Eoliennes offshore

Une réunion plénière du groupe de travail élargi aux maîtres d'ouvrage (EDF, GDF-SUEZ, IBERDROLA) est prévue le 29 Janvier 2014.

Groupe de travail sur la révision de la norme NF P 94-270 (aspect parois clouées)

Le groupe de travail se réunit le 29 janvier en séance plénière. Il est envisagé de procéder à un calcul du parement sur des cas tests. Suivant les résultats il sera

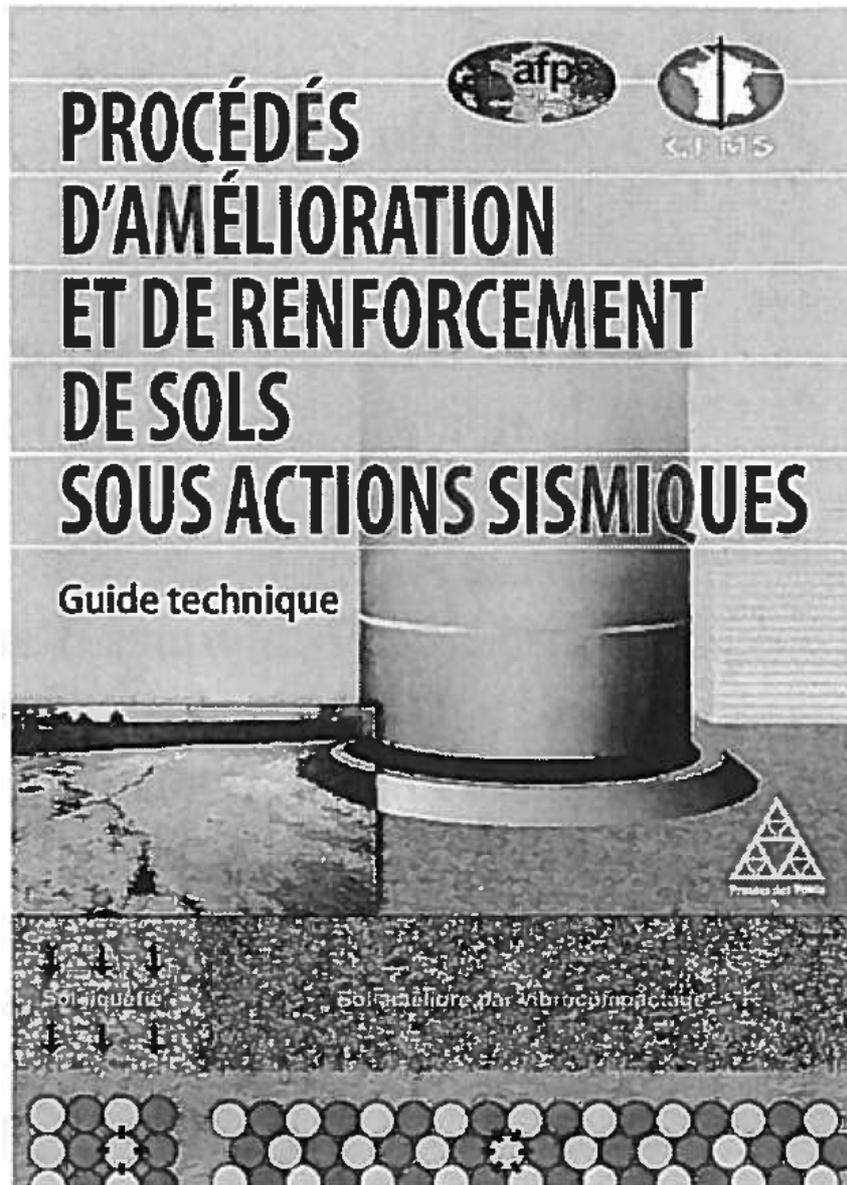
proposé des amendements à la norme qui pourront prendre la forme de règles forfaitaires avec des calculs simplifiés.

Groupe de travail tirants d'ancrage

S.LAMBERT souhaite faire partie du groupe de travail.

7. Points divers

Traduction en anglais du guide AFPS / CFMS relatif au procédé d'amélioration et de renforcement de sols sous action sismique



Les membres de la Commission font état d'une forte demande à l'international de la traduction en anglais de ce guide. La traduction devra être faite par des traducteurs spécialisés (ex. ceux ayant travaillé sur le projet ASIRI). Il faudra prévoir un glossaire.

Prochaines réunions de la commission technique



- Le 25 Mars 2014 (après-midi)
- Pour info AG du CFMS le 13 Juin 2014, prochaine réunion de la commission immédiatement après les élections et le renouvellement des membres de la commission

Bruno DEMAY
Président de la
Commission Technique

Hervé LE BISSONNAIS
Vice-président de la
Commission technique

Annexe : Note SYNTEC sur les GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES

NOTE D'INFORMATION SUR LES ASPECTS GEOTECHNIQUES DU DIMENSIONNEMENT ET DE LA MISE EN ŒUVRE DES GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES. EXEMPLE DES PIEUX ENERGETIQUES

SYNTEC INGENIERIE

*Ce document a été élaboré par le Comité Géotechnique et soumis à Luis CARPINTEIRO
du COPREC.*

Version 5 – octobre 2012

1. PREAMBULE

Les géostructures énergétiques sont des échangeurs thermiques placés dans des ouvrages en interaction sol-structure (pieux, parois moulées, tunnels,...), associés à une pompe à chaleur, permettant le chauffage ou la climatisation de locaux d'habitation ou autres.

Cette technologie profite de la nécessité de mise en place de ces infrastructures, moyennant cependant quelques précautions de dimensionnement et de mise en œuvre.

Largement développée dans beaucoup de pays d'Europe, cette technologie a vu le jour vraisemblablement en Autriche il y a déjà une trentaine d'années. La France s'éveille depuis peu à ces technologies dans le cadre du développement des énergies renouvelables, renforcé par les orientations du Grenelle de l'Environnement. Avec un financement de l'Ademe, le COFOGE (CONception de FONdations GEothermiques) piloté par le CSTB, a remis un rapport d'étude en 2007 ayant pour objectif de réussir la transposition de cette technologie vers la France. Quelques maîtres d'ouvrage ont compris le potentiel bénéfique économique d'une telle technologie dans une logique de développement durable. Mais à ce jour, les réalisations restent encore très limitées : méconnaissance de cette technologie ? Freins techniques ? Absence de norme ? A priori sur le coût de cette technologie ? Une nouvelle impulsion s'avérerait nécessaire.

Suite à une table ronde organisée par le Comité Géotechnique de Syntec Ingénierie lors des 9^e Rencontres de l'Ingénierie à Paris en octobre 2010, ce Comité a sollicité la création d'un Groupe de Travail ayant pour mission d'accompagner le développement de cette technologie, en identifiant les problématiques à résoudre par le géotechnicien dans la conception et dans la mise en œuvre de ces géostructures énergétiques.

D'autres initiatives voient le jour aujourd'hui, que ce soit dans le cadre de projets de l'ANR (PINRJ, GECKO) ou de travaux de recherche et développement (CSTB, IFSTTAR, BRGM, ENPC-CERMES,..) mais également sous l'impulsion d'initiatives privées. Une récente journée technique du CFMS a consacré à ce sujet une série d'exposés.

La présente note fait état des réflexions au sein du Groupe de Travail du Comité Géotechnique de Syntec Ingénierie. La problématique pour le géotechnicien est de savoir si la mise en œuvre de cette technologie est de nature à modifier le dimensionnement des infrastructures, à modifier le comportement du sol autour de ces ouvrages en interaction avec lui, voire de perturber la stabilité des avoisinants. Il s'agit également d'identifier les

compléments d'étude à mener dans le cadre de l'enchaînement des différentes missions géotechniques de la norme NF P 94-500.

2. LES GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES

Le principe des géostructures énergétiques est relativement simple. Il s'agit de profiter de la construction dans le sol d'un ouvrage de fondation, de soutènement ou de génie civil (pieu de fondation, paroi moulée, tunnel,...) pour l'équiper en dispositifs échangeurs de chaleur reliés à une pompe à chaleur et initier des échanges thermiques entre le sol support et l'ouvrage cible (bâtiment, tunnel, parking,...). Quand des calories sont prélevées dans le sol, elles participent pro parte aux besoins en chauffage de l'ouvrage cible ; inversement, quand des calories sont rendues au sol, elles participent à la climatisation (refroidissement) de l'ouvrage cible.

La nature et les propriétés thermiques du sol, la présence d'une nappe et ses caractéristiques d'écoulement, la géométrie des ouvrages en interaction et les besoins thermiques de l'ouvrage cible conditionnent les caractéristiques du dispositif échangeur à mettre en place. Ce dispositif comprend a minima des tubes en PEHD remplis d'eau claire ou glycolée constituant les échangeurs thermiques disposés au sein de l'ouvrage en interaction, reliés à une pompe à chaleur par un ensemble de connexions tubulaires (figure 1).

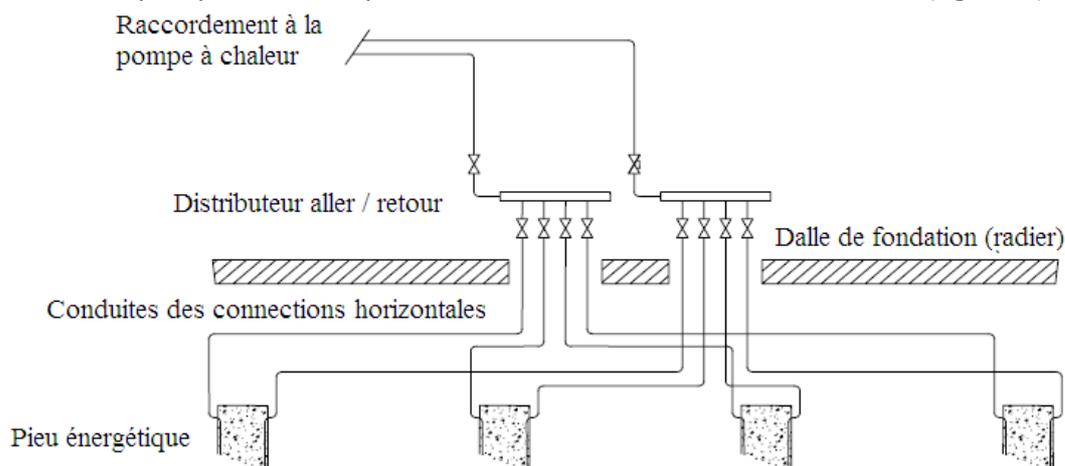


Figure 1 Dispositif de connexion entre les pieux énergétiques et la pompe à chaleur (schéma CSTB, Rapport du COFOGE 2007)

3. RETOURS D'EXPERIENCES

Les géostructures énergétiques se sont développées en Europe depuis une petite trentaine d'années, principalement avec les pieux énergétiques (pieux de fondation équipés en échangeurs de chaleur). C'est peut être en Autriche que les premières réalisations ont vu le jour. Comme le montre la figure 2, le développement sur 20 ans des pieux énergétiques a été très important dans ce pays.

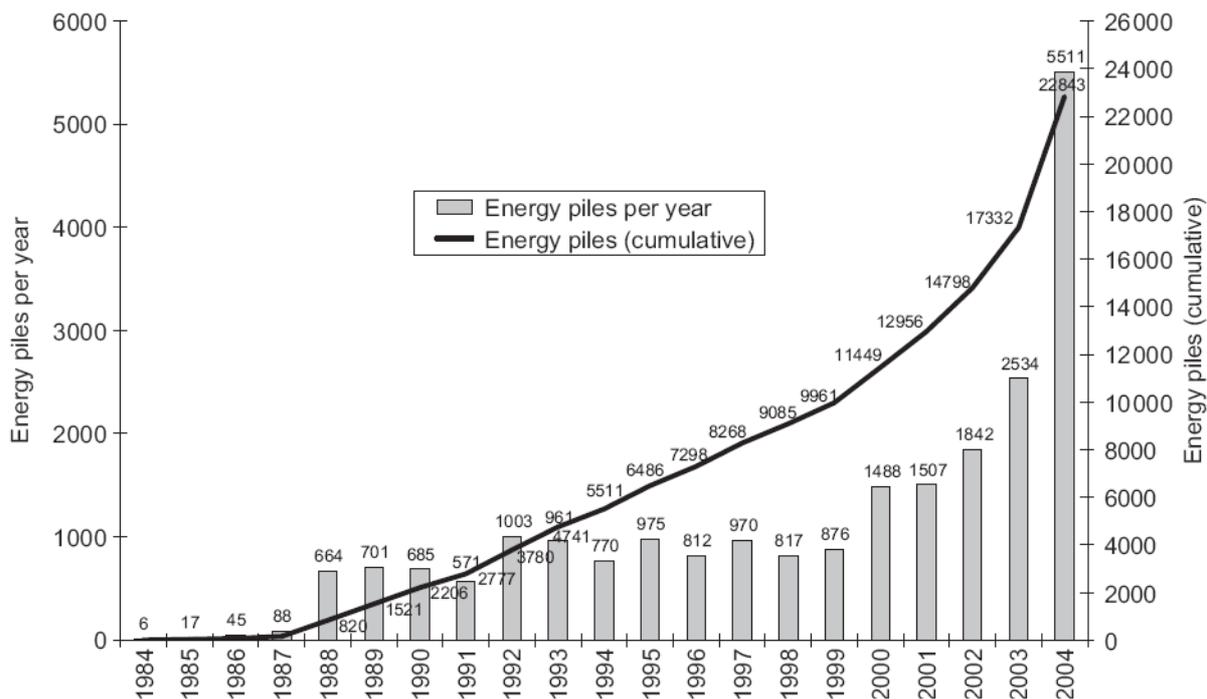


Figure 2 Evolution du nombre de pieux énergétiques en Autriche entre 1984 et 2004 (H. Brandl, *Géotechnique* 56, N°2, pp81-122, 2006).

De nombreux autres pays européens se sont tournés vers cette technologie. Un développement important est connu en Suisse, en Allemagne et au Royaume Uni. Des exemples en Espagne sont relatés, en particulier dans la mise en œuvre en ouvrages souterrains (métro de Madrid). Lors de la consultation des retours d'expérience qui nous ont été accessibles, aucune difficulté géotechnique particulière touchant aux ouvrages et à leurs avoisinants n'a été rapportée. A priori, rien n'existe à l'étranger sur le dimensionnement géotechnique spécifique des pieux servant d'échangeurs thermiques.

L'École Polytechnique Fédérale de Lausanne a mené des essais sur un pieu instrumenté ($\Delta T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$). L'expérimentation a montré un comportement réversible du pieu entre la phase de chauffage et la phase de refroidissement (le déplacement du pieu n'a pas atteint le seuil où le frottement ne permettrait pas au pieu de revenir à son état initial). Egalement, les déformations radiales sont de type thermo-élastiques (réversibles avec la variation de température qui les provoque) et ne montrent pas de décollement du pieu par rapport au sol après un cycle thermique (Laloui et al., 2003). Cette expérimentation montre en effet que la déformation du pieu est de type thermo-élastique, et son intensité, relativement importante, dépend de la couche de sol traversée. Les contraintes supplémentaires dans le pieu peuvent être importantes (charge doublée dans le pieu par rapport à la valeur en tête). En outre, par la nature uniforme des effets thermiques, l'effet mécanique est de solliciter plus fortement la pointe du pieu au contraire des charges liées au poids de la structure qui se concentrent vers le haut du pieu et s'atténuent avec la profondeur. Enfin l'opposition des directions de mouvement (soulèvement pour la thermique, tassement pour la statique) fait que l'adhérence n'est pas affectée par la température et qu'un soulagement de la mobilisation du frottement latéral est noté en cas d'échauffement.

Fig. 27. Schématisation des principaux effets thermiques.

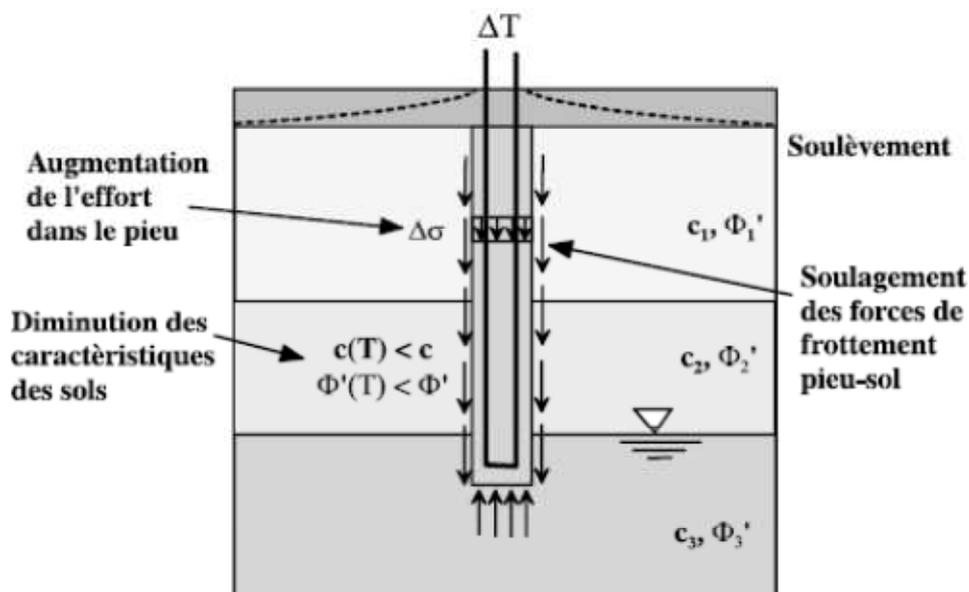


Figure 3 Schématisation des principaux effets thermiques sur le sol et le pieu par accroissement de température dans le pieu (Laloui et al., 2003)

4. CONDITIONS FAVORABLES A LA MISE EN ŒUVRE DE PIEUX ENERGETIQUES

Le retour d'expérience des nombreuses réalisations en Europe permet de définir un ensemble de conditions favorables à l'efficacité de pieux énergétiques.

- *Géométrie de l'ouvrage-cible* : une emprise au sol du bâtiment importante par rapport à son élancement, favorisant ainsi une surface d'échange avec le sol satisfaisante. Plus un bâtiment sera élancé (par exemple IGH) moins les besoins en chauffage/climatisation pourront être satisfaits.
- *Caractéristiques thermiques* : outre leur qualité géotechnique médiocre justifiant la mise en œuvre de pieux de fondation, les sols en interaction avec les pieux présenteront des caractéristiques thermiques favorables, appréciées principalement par la conductivité thermique (voir Annexe 1). Lorsque celle-ci est supérieure à 1,3 W/m.K, la technologie est possible ; elle devient favorable à 2 W/m.K et excellente au-delà de 3 W/m.K. Plus le sol est fin, moins il est conducteur, ainsi le contexte est a priori plus favorable dans un sol sableux qu'argileux (voir Annexe 2).
- *Caractéristiques hydrogéologiques* : pour assurer une meilleure conductivité thermique, les sols en interaction doivent être saturés (baignés par une nappe). Par ailleurs, la vitesse d'écoulement de la nappe influe sur la régénération thermique des terrains et constitue une donnée d'entrée pour la conception du système. Si l'écoulement est rapide, la recharge thermique se fait naturellement par le renouvellement de l'eau. Dans ce cas, un stockage alternatif (balayage thermique), ou non de chaleur ou de froid, n'est pas envisageable (Rapport COFOGE, 2007). Si l'écoulement est lent, la recharge thermique du terrain est nécessaire pour maintenir une température constante dans le sol. Pour un système à pieux échangeur une vitesse d'écoulement de 0.5 à 1 m/j peut être considérée comme la limite entre les deux domaines (Fromentin et al, 1999).

5. EFFET D'UNE VARIATION DE TEMPERATURE SUR UN PIEU DE FONDATION ET RECOMMANDATIONS DE CONCEPTION

Le comportement d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques a fait l'objet de recherches expérimentales et théoriques basées sur l'instrumentation de pieux et sur des simulations numériques, en particulier à L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Laloui et al., 2003).

Les variations thermiques dans un pieu induisent des contraintes et des déformations qui sont essentiellement fonction de :

- Caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le pieu : module de déformation : E_{pieu} et coefficient de dilatation : β
- Caractéristiques mécaniques des terrains : lois de mobilisation du frottement latéral et de la résistance de pointe des pieux. Frank et Zhao (1982) ont proposé une formulation de ces lois qui s'appuie sur les valeurs du module pressiométrique E_M , du frottement limite q_s et de la résistance limite en point q_u .
- Degré de liberté du pieu sur toute sa longueur et, notamment en tête, en fonction du comportement de la structure fondée sur ce pieu.

Efforts induits sur des pieux en béton

Sous l'effet d'une variation thermique la déformation du pieu en un point donné est la suivante :

- A déformation libre : $\varepsilon_1 = \beta \times \Delta T$
- A déformation gênée : $\varepsilon_g = n \times \beta \times \Delta T$ avec n : taux de liberté. $n=0$ si point à déplacement empêché.

La variation de contrainte correspondante dans le pieu : $\sigma = -E_{\text{pieu}} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_g)$

Si $n = 1$ (pieu libre) : $\varepsilon_g = \varepsilon_1$ et donc $\sigma = 0$

Si $n = 0$ (pieu à déformation empêchée) : $\varepsilon_g = 0$ et $\sigma = -E_{\text{pieu}} \times \varepsilon_1$

Exemple numérique

$$E_{\text{pieu}} = 30000 \text{ MPa}$$

$$\beta = 10^{-5}$$

Variation de température : $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Si le pieu est complètement bloqué en tout point : $\sigma = -30000 \times 10^{-5} \times 10^\circ\text{C} = -3 \text{ MPa}$

Si le pieu est partiellement bloqué avec $n = 0.5$:

$$\sigma = -30000 \times (10^{-5} \times 10^\circ\text{C} - 0.5 \times 10^{-5} \times 10^\circ\text{C}) = -1.5 \text{ MPa}$$

Une modélisation tenant compte du comportement axial du pieu et du degré de liberté en tête peut être réalisée. Des programmes de calcul sont actuellement disponibles pour l'évaluation des effets des sollicitations thermiques sur les pieux.

Analyse du comportement des pieux sous sollicitations thermiques :

- 1- Pieu flottant – bloqué en tête
 - 1-1 Réchauffement du pieu : augmentation de l'effort en tête du pieu. Enfouissement de la base du pieu.
 - 1-2 Refroidissement du pieu : Diminution de l'effort en tête du pieu. Soulèvement de la base du pieu.
- 2- Pieux semi flottants – bloqués en tête

- 2-1 Réchauffement du pieu : augmentation de l'effort en tête du pieu. Augmentation de l'effort à la base du pieu. Léger enfoncement de la base du pieu.
- 2-2 Refroidissement du pieu : Diminution de l'effort en tête du pieu. Soulèvement de la base du pieu.

Le dimensionnement des pieux énergétiques doit prendre en compte l'augmentation des contraintes induites par le réchauffement des matériaux constitutifs des pieux. A titre d'exemple, l'augmentation des contraintes dans un pieu en béton complètement bloqué ($n=1$ sur toute la longueur du pieu) est estimée de l'ordre de 0.3 MPa par degré de réchauffement. Elle est de l'ordre de 0.15 MPa par degré de réchauffement dans le cas d'un pieu partiellement bloqué. Cette augmentation n'est pas négligeable et doit donc être bien prise en compte dans le dimensionnement des pieux.

Les déformations induites par le réchauffement (soulèvement en tête) ou par le refroidissement (tassement en tête) restent très faibles et non préjudiciables aux structures. Au cours de la phase de conception, une modélisation thermomécanique du massif de sol, hôte du champ de pieux de fondation, est fortement recommandée. En particulier, pour le cas d'un groupe de pieux, dont certains seraient équipés en pieux énergétiques et d'autres non, cette modélisation peut apporter des résultats importants sur le comportement global du massif de fondations et sur ses effets potentiels sur la structure de l'ouvrage-cible.

Pour ce faire, il est nécessaire d'accéder à des caractéristiques thermiques du terrain de fondation. Une première approche de celles-ci consiste à rechercher et utiliser, au stade de la faisabilité, des valeurs caractéristiques bibliographiques par famille de terrains ou de composants de sols et de roches (Annexe 2).

A un stade plus avancé d'avant-projet, un Test de Réponse Thermique (TRT) au droit du site de fondation est fortement recommandé (Annexe 3).

6. ELEMENTS D'APPRECIATION D'ORDRE GEOTECHNIQUE A CONSIDERER

6.1 Conception des géostructures énergétiques

L'influence des charges et décharges géothermiques successives doit être étudiée.

Pour mener à bien ces études, il est nécessaire de compléter la définition des courbes de mobilisation du frottement qui sont bien connues pour des chargements monotones (par les essais de pieu classiques – Lois de Frank et Zhao qui sont non linéaires) pour couvrir également des cycles déchargement-charge. Seule la constitution d'une base de données à partir du suivi d'ouvrages instrumentés pourra fournir les informations nécessaires à cette extension des courbes de mobilisation. Des essais de cisaillement en laboratoire, menés sous raideur et température contrôlées, peuvent également être utiles.

En l'état actuel des connaissances, la forme et l'amplitude de la courbe de mobilisation du frottement sous la décharge, pouvant être provoquée par une sollicitation thermique, demeurent méconnues. Toute modélisation s'appuie donc sur des hypothèses qui sont de simples conjectures : en particulier si le déchargement se fait à partir d'une situation où le frottement a atteint une valeur q_0 inférieure à la valeur limite q_s , peut-on développer depuis cet état un frottement complémentaire ($-q_0 - q_s$) et avec quelle raideur ce frottement complémentaire peut être mobilisé ?

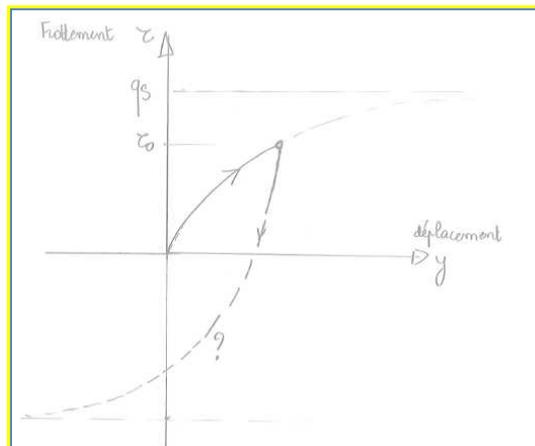


Figure 4 : Nécessité d'étendre la loi de mobilisation du frottement applicable à un chargement monotone croissant pour couvrir le cas d'un déchargement provoqué par la sollicitation thermique.

Les mêmes incertitudes pèsent sur la construction de la loi de mobilisation en pointe à considérer en cas de décharge provoquée par la sollicitation thermique.

Il faut également examiner, s'il existe, un phénomène de dégradation de ces courbes chargement –déchargement sous l'effet de la répétition d'un grand nombre de cycles (les résultats du Projet National Solcyp qui doit se conclure courant 2013 pourront se révéler intéressants).

L'étude de la réponse de la structure portée à un déplacement de ses appuis est également nécessaire : la réaction de la structure portée en tête de la géostructure peut-elle être caractérisée par un effort de valeur constante, une raideur constante ou un déplacement nul imposé ?

Du point de vue réglementaire, il s'agit également de voir comment intégrer les sollicitations d'origine thermique dans les vérifications ELS et ELU des fondations concernées. A l'ELS, comment introduire le déplacement en tête des pieux dans le calcul de structure. A l'ELU, il faut statuer sur le caractère permanent ou transitoire des sollicitations mécaniques provoquées par les cycles thermiques (déterminer le coefficient de pondération applicable à l'ELU 1,35 ou 1,5). Quel degré de surdimensionnement vis-à-vis de la capacité statique du pieu faut-il introduire pour couvrir les sollicitations d'origine thermique ?

Le fonctionnement de l'installation doit être étudié dans le temps : application des charges d'ouvrages seules, puis mise en service de l'installation thermique. Ceci fera donc distinguer le comportement initial (sous les actions de poids propre) de celui atteint après un grand nombre de cycles de fonctionnement du système thermique. La fréquence des cycles d'exploitation thermique s'avèrera un facteur clé (1 seul cycle annuel charge – décharge ou une succession de cycles plus courts ?). Ceci dépendra s'il y a un renouvellement par la nappe (fonctionnement monotone) ou non (fonctionnement cyclique avec recharge climatique - cas d'une installation assurant également la climatisation ou cas d'une installation complétée par des panneaux solaires pour recharger en été-)

Les effets de groupe sont à examiner quand plusieurs éléments échangeurs sont rapprochés du point de vue thermique comme du point de vue mécanique (par exemple dissymétrie entre les pieux du groupe quand certains sont exploités et d'autres non. L'influence éventuelle sur les ouvrages voisins doit également être étudiée.

6.2 Altération éventuelle du comportement des sols de fondation

Le comportement du sol peut être affecté par une élévation de température (dégazage, vaporisation, retrait). Cependant, l'exploitation des géostructures énergétiques impose des variations qui ne dépassent pas une plage 2°C à 30°C. Dans cette plage, qui est proche de celui des niveaux de variation thermique de certains écarts saisonniers naturels, il est d'usage en géotechnique de négliger les effets thermiques.

Le fonctionnement de l'installation doit également être contrôlé vis-à-vis de l'abaissement de la température du sol : le gel est à proscrire impérativement.

De façon générale, les effets thermiques sont surtout sensibles lors du premier cycle de chargement et nécessitent une attention particulière dans l'observation du comportement statique de la structure lors de la première année de mise en service des pieux échangeurs.

La tendance à dégrader les caractéristiques de résistance des sols qu'entraîne une augmentation de la température semble secondaire dans le cas des pieux énergétiques (LALOUÏ et al., 2003).

7. CONCLUSION

La technologie des géostructures énergétiques ne présente pas de difficulté rédhibitoire du point de vue du géotechnicien. L'identification de conditions favorables et des précautions sur le dimensionnement des ouvrages équipés en échangeurs de chaleur, en interaction directe avec le terrain, est cependant à considérer. Dans certains cas, des surdimensionnements peuvent être nécessaires, susceptibles de conduire à des surcoûts cependant relativement limités. Ce qui est indispensable de notre point de vue, c'est d'associer, dès la faisabilité d'une opération, le géotechnicien, l'hydrogéologue et l'énergéticien pour couvrir collégalement la problématique. L'accumulation et la valorisation de retours d'expérience au sein de la profession de géotechnicien, la réalisation de projets de recherche et la communication vers les maîtres d'ouvrage sont indispensables pour asseoir cette technologie dans la pratique courante. Des applications avec d'autres ouvrages en interaction que les pieux (parois moulées, tunnels,...) devraient rapidement se développer dans les prochaines années avec la double exigence d'aménagement/rénovation urbaine et l'optimisation de la dépense énergétique dans une logique de développement durable.

DEFINITIONS

Géostructure énergétique = échangeur géothermique disposé dans un ouvrage en interaction avec le sol/ sous-sol ;

Pieu géothermique ou pieu énergétique ou fondation thermoactive = pieu de fondation équipé d'échangeur de chaleur ;

Pompe à chaleur (PAC) = dispositif thermodynamique qui prélève la chaleur présente dans un milieu pour la transférer vers un autre ;

Echangeur géothermique vertical = échangeur géothermique très basse énergie qui permet de prélever ou d'injecter de la chaleur au sol/sous-sol. Son usage, en liaison avec la PAC, peut être le chauffage ou la climatisation (PAC réversible), mais également le refroidissement (« free cooling ») par by-pass de la PAC. Cet échangeur est constitué d'une boucle de sonde raccordée à la PAC. Un fluide caloporteur circule à l'intérieur des tubes, en circuit fermé, pour prélever ou restituer la chaleur du sol/sous-sol, la transporter et la restituer à la PAC.

BIBLIOGRAPHIE

Thermo-mechanical behaviour of soils, Lyesse Laloui, RFGC, *Environmental Geomechanics*, pp. 809-843, 2001.

Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur, Lyesse Laloui, Matteo Moreni et Laurent Vulliet, *Canadian Géotechnical Journal* n° 40, PP.388-402, 2003.

NF X 10-970 – Forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) – Réalisation, mise en œuvre, entretien, abandon.

prNF X 10-960 – Forage d'eau et de géothermie – Systèmes caloporteurs pour eau glycolée et tubes de type polymère (boucles de sonde) – Exigences.

NF P 94-500 (décembre 2006) – Missions géotechniques.

COFOGE (Conception de fondations géothermiques) – Rapport final – CSTB – ESE/ENR-07.044RS, septembre 2007.

Interfaces Géothermie et Géotechnique en Europe. Actes des Tables Rondes des 9^e Rencontres de l'Ingénierie, Syntec Ingénierie, octobre 2010.

Modélisation 3D de pieux sous sollicitation couplée mécanique et thermique cyclique. Rapport de stage Laëticia Falque (ENTPE) à Antea Group, août 2011.

JOLIVIN, P. (2002). Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthologie et détermination des zones potentielles. Rapport final. Programme géothermie, GEOLEP-EPFL, Lausanne.

FROMENTIN, A., PAHUD, D., JAQUIER, C. & MORATH, M. (1997). Recommandations pour la réalisation de pieux échangeurs. Rapport final. Programme de recherche : géothermie, Office Fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne.

FROMENTIN, A., PAHUD, D., LALOUI, L. & MORATH, M. (1999). Pieux échangeurs : conception et règle de pré-dimensionnement. *Revue française de génie civil* ; 6/1999, vol. 3, pp. 387-421.

Norme SIA 384/6 (2010). Sondes géothermiques. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich.

Annexe 1 : Caractéristiques thermiques d'un terrain

Généralités

La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont les deux principales grandeurs qui caractérisent thermiquement un sol à travers son aptitude à échanger de la chaleur avec une géostructure qui le recoupe.

La conductivité thermique (λ) exprimée en $W.m^{-1}.K^{-1}$ intervient dans le processus de transfert de chaleur en régime permanent. L'équation qui en découle permet de rendre compte de la distribution des températures à l'équilibre dans le milieu et donne ainsi une borne supérieure des valeurs qui pourraient être localement atteintes dans la géostructure et son voisinage immédiat. La conductivité thermique caractérise le flux de chaleur sous un gradient thermique unitaire.

Dans les sols la conductivité thermique dépend de la teneur en eau (ou teneur en glace) et de sa densité sèche (courbes de variation établies par Kersten).

Le tableau ci-après donne quelques valeurs de conductivité thermique pour les principaux matériaux et composants des sols rencontrés en géotechnique.

Conductivité thermique λ	cal/s.cm.°C	W. m ⁻¹ .°K
Air	0,000058	0,024
Eau	0,00144	0,60
Glace	0,0053	2,25
Sol (moyen)	0,0023	0,25 – 2,5 (~1,7)
Béton	0,0022	1,3 – 1,7

Tableau 1 – Conductivité thermique des principaux matériaux et phases rencontrés en géotechnique [1]

De la même façon, **la diffusivité thermique (K) exprimée en $m^2.s^{-1}$** intervient dans l'équation de transfert en régime transitoire et permet de tenir compte de la variabilité des conditions aux limites au cours du temps, autrement dit des cycles fonctionnement saisonnier d'une géostructure.

La diffusivité thermique dépend de la conductivité thermique du matériau et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Elle est définie par :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c}$$

avec :

ρ : masse volumique du sol ($kg.m^{-3}$)

c : chaleur thermique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), aussi appelée chaleur spécifique ou chaleur massique.

Noter l'analogie avec les problèmes d'écoulement :

Conductivité thermique k perméabilité k

Capacité thermique C coefficient d'emmagasinement S

Diffusivité thermique α coefficient de consolidation c_v

La conductivité intervient sur le régime permanent. La diffusivité intervient sur le régime transitoire (rapidité avec laquelle vont se faire les échanges thermiques).

Comment caractériser thermiquement un sol ?

On peut distinguer trois approches pour estimer les caractéristiques thermiques d'un sol :

- Bibliographique quand aucune mesure in situ ou sur prélèvement n'est disponible ;
- En laboratoire à partir d'autres caractéristiques mesurables sur échantillon ;
- In situ par des essais en grandeur réelle.

La conductivité et la diffusivité thermiques varient très sensiblement selon le type de sol et il est toujours difficile sinon dangereux d'en faire une estimation à partir de la classification des sols utilisée en géotechnique (argile, sable, gravier, argile sableuse, limon sableux,...). Il existe différentes tables proposant des gammes de valeurs pour différents matériaux secs ou saturés mais avec une variabilité souvent très importante et d'usage souvent incertain.

On peut notamment citer la norme suisse SIA 384-6 en remarquant que les matériaux décrits ne correspondent pas toujours à la nature de certains sols pourtant fréquemment rencontrés tels qu'un sable argileux, une argile silteuse ou encore un limon.

Les sols sont des milieux poreux constitués d'un assemblage minéral dont les interstices sont occupés par de l'eau et de l'air en proportion variable. La conductivité thermique d'un matériau dépend ainsi de trois facteurs qui dépassent la simple caractérisation lithologique :

- La composition minéralogique de la phase solide
- La porosité totale (n)
- La saturation en eau (S_w)

Dans le tableau ci-après sont reportées les valeurs de conductivité thermiques de l'eau, de l'air et des minéraux communément rencontrés dans les sols. On constate une forte variabilité entre espèces minérales, notamment entre le quartz et les minéraux argileux. Le contraste est encore plus marqué avec l'eau et surtout l'air, très isolant. Il en résulte qu'un matériau sera d'autant plus conducteur que sa porosité sera faible, qu'il sera proche de la saturation et que sa teneur en quartz sera importante.

Phase	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Quartz	7.7
Calcite	3.5
Dolomie	2.3
Feldspath	2.3
Smectite, illite, inter-stratifiés	1.8- 2.0
Kaolinite	2.0-2.4
Verre (silice amorphe)	1.3
Eau	0.6
Air (sec)	0.03

Tableau 2 – Conductivité thermique des principaux minéraux, de l'eau et de l'air [2]

De nombreux travaux théoriques [3] et expérimentaux [4] [5] ont montré que la conductivité thermique d'un matériau peut être estimée à 10% près au moyen d'un modèle géométrique à partir de grandeurs aisément mesurables en laboratoire. En considérant un milieu à trois phases, solide (s), eau (w) et air (a), l'expression prend la forme :

$$\lambda = \lambda_w^\theta \cdot \lambda_a^{n-\theta} \cdot \lambda_s^{1-n}$$

où n désigne la porosité totale et θ la teneur en eau volumique. La conductivité thermique de la phase solide est donnée de la même façon par la relation :

$$\lambda_s = \prod_i \lambda_i^{x_i}$$

où λ_i et x_i représentent respectivement la conductivité thermique et la fraction volumique de la phase minérale, avec :

$$\sum_i x_i = 1 - n$$

L'application de cette méthode nécessite bien entendu de disposer d'analyses minéralogiques et de mesures de porosité et de teneur en eau (pour des sols non saturés) sur quelques échantillons de sols intacts. Elle reste simple d'usage et nécessite aucun moyen de mesure spécifique (aiguille chauffante, barre divisée...).

Influence de la température

Les paramètres thermiques qui caractérisent les matériaux sont sensibles à la température, mais tous ne varient pas dans le même sens. A titre d'exemple, la conductivité thermique de l'eau croît quand la température augmente alors que celle des minéraux décroît. Cependant, dans la gamme 5-25 °C qui intéresse les géostructures énergétiques et de manière plus générale la géothermie dite de très basse température, les paramètres thermiques peuvent être considérés comme invariants.

Critère de faisabilité

De la conductivité thermique des terrains dépend la puissance spécifique qui pourra être extraite par la géostructure énergétique et donc l'adéquation et la rentabilité de l'installation projetée. Au stade d'une étude de faisabilité et de pré-dimensionnement les données de terrains sont souvent rares sinon inexistantes et la conductivité thermique des terrains concernés par le projet ne peut être approchée qu'en référence à la bibliographie se rapportant à des matériaux et des contextes analogues. Il est alors recommandé comme le précise la norme suisse SIA 384-6 d'appliquer aux conductivités estimées un coefficient modérateur de 0.8 qui donnera une valeur basse à prendre en considération pour les calculs de dimensionnement. Selon l'importance du projet ou pour des stades plus avancés il néanmoins judicieux sinon indispensable de recourir à une estimation plus fiable soit par méthode indirecte (modèle de conductivité) soit, de préférence, au moyen de tests de réponse thermique qui donneront toujours les résultats les plus représentatifs de l'ensemble des terrains concernés.

Références

- [1] Mitchell, 1991. Ground Engineer's Reference book, Bell editor
- [2] Demongodin L., 1992. Reconnaissance de l'état thermique des bassins sédimentaires. Transferts de chaleur par conduction et convection. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II.
- [3] Piggot A.R. & Elsworth D., 1992. Analytical models for flow through obstructed domains. J. Geophys. Res., 97, 2085-2093.
- [4] Brigaud F. & Vasseur G., 1989. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. Geophys. J., 98, 525-542.
- [5] Vasseur G., Brigaud F. & Demongodin L., 1995. Thermal conductivity estimation in sedimentary basins. Tectonophysics, 244, 167-174.

Annexe 2 : Caractéristiques thermiques de différents matériaux

Paramètres géothermiques des sols, roches et du béton

Classe	Type	Conductivité thermique λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹		Capacité thermique volumique Scv MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	
		Sec	saturé	sec	saturé
Sols	Argiles	0,2 – 0,3	1,1 – 1,6	0,3 – 0,6	2,1 – 3,2
	Limons	0,2 – 0,3	1,2 – 2,5	0,6 – 1	2,1 – 2,4
	Sables	0,3 – 0,4	1,7 – 3,2	1 – 1,3	2,2 – 2,4
	Graves	0,3 – 0,4	1,8 – 3,3	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4
Roches	Calcaire	1,5 – 3		1,9 – 2,4	
	Craie Marnes Molasse argileuse	1,2 – 2,5		1,2 – 2,5	
	Grès Molasse sableuse	2 – 6,5		2 – 2,1	
	Gneiss	2,5 – 4,5		1,6 – 3,1	
	Granite	1,3 – 2,3		2,4 – 2,6	
	Basalte	0,9 – 2		1,8	
Matériaux	Béton	0,9 – 2		1,8	
	Mortiers améliorés	1,5 – 2		/	
	Bentonite	0,5 – 0,75		/	
	Bentonite + sable + ciment	0,65 – 0,8		/	
	Polypropylène	0,17 – 0,20		1,7	

Annexe 3 : Le Test de Réponse Thermique (TRT)

Pour réaliser cet essai TRT, il faut mettre en place un échangeur thermique test. Il s'agit en fait d'une sonde géothermique verticale dans le sol au droit du site d'implantation des pieux de fondation.

Ce Test de Réponse Thermique permet d'accéder à la fois à la conductivité thermique moyenne du terrain λ et à la résistance équivalente du pieu géothermique R_b , grandeurs dimensionnantes du dispositif (voir spécifications de la norme sur la sonde géothermique verticale, NF X 10-970).

Le principe du test consiste à :

- Mesurer la température initiale moyenne du terrain le long de la sonde, en faisant circuler le fluide présent dans la sonde jusqu'à atteindre un régime permanent ;
- Mesurer la réponse thermique (évolution de température) d'un terrain à l'injection d'une puissance thermique constante pendant toute la durée du test à l'aide d'un réchauffeur. L'évolution de la température est mesurée en entrée et en sortie de sonde ;
- Interpréter ces évolutions pour en extraire les grandeurs suivantes : conductivité thermique moyenne du terrain λ et résistance équivalente de la sonde géothermique R_b (en ayant estimé au préalable la chaleur spécifique C_p). La méthode d'interprétation est basée sur la théorie de la source linéaire de chaleur (Gehlin, 2002). En pratique la conductivité est calculée à partir de la pente obtenue en reportant l'évaluation de la température du fluide en sortie de sonde en fonction du logarithme du temps.

Référence :

GEHLIN S. (2002) *Thermal Response Test*. Doctoral Thesis, Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Luella, Suède.