

ELEMENTS DE JUSTIFICATION MECANIQUE DES ECRANS DE SOUTÈNEMENT ENERGETIQUES

SOME ELEMENTS FOR THE MECHANICAL DESIGN OF ENERGY RETAINING WALLS

Julien HABERT¹, Sébastien BURLON²

¹ Cerema, Lille, France

² IFSTTAR, Champs sur Marne, France

RÉSUMÉ – Les écrans de soutènement énergétiques sont soumis à des variations de température conduisant à i) des déplacements complémentaires, ii) des efforts structuraux additionnels et iii) une modification de la résistance géotechnique. En se basant sur la modélisation numérique d'une configuration type, le comportement caractéristique de ces ouvrages est appréhendé, puis des règles de justification sont proposées.

ABSTRACT – Energy retaining walls are subjected to temperature changes that can lead to i) additional displacements, ii) additional structural forces and iii) and evolving of geotechnical resistances. After modelling of a typical configuration to assess the specific behaviour of these structures, design rules are proposed.

1. Introduction

Les géostructures énergétiques sont des ouvrages géotechniques assurant initialement une fonction mécanique (fondations profondes, écrans de soutènement, etc.) et étant également utilisés comme échangeurs géothermiques. Pouvant satisfaire les besoins énergétiques des constructions en termes de chauffage et de climatisation, elles présentent un intérêt économique et environnemental certain. Les géostructures énergétiques sont mises en oeuvre depuis bientôt 35 ans en Europe. Les projets de fondations profondes énergétiques sont de plus en plus nombreux. Par ailleurs, la technique a été étendue à des parois moulées énergétiques, et notamment sur les stations enterrées du métro de Vienne (Brandl, 2006). En France, le développement de la technique est plus tardif, mais son intégration à des parois moulées peut être notée sur les stations du métro de Rennes ainsi que sur les prolongements actuels des lignes 12 et 14 du métro parisien (Bardoneschi *et al.*, 2014).

Néanmoins, les changements de température imposés associés au fonctionnement de ces ouvrages, affectent l'écran de soutènement énergétique mais également les sols environnants. Ils se traduisent notamment, dans les plages de température considérées, par des phénomènes de dilatation et de contraction. Ces variations volumiques spécifiques susceptibles de conduire, en première approche, à i) des déplacements complémentaires, ii) des efforts structuraux additionnels et iii) une modification de la résistance géotechnique. Ces différents effets doivent être évidemment pris en compte dans la justification mécanique des géostructures.

2. Problématique

2.1 Réglementation

Les variations de température et leur conséquence sur le comportement (et donc la justification) des structures de génie-civil constituent des problématiques connues. Ainsi, les règlements de calculs permettent par exemple i) de tenir compte des variations de température liées à l'ensoleillement sur un tablier d'ouvrage d'art ou ii) de dimensionner les parois d'un réservoir permettant le stockage d'un contenant présentant une température sensiblement différente des conditions moyennes extérieures.

Cependant, concernant les géostructures énergétiques, il n'existe ni normes de calcul ni règles de l'art à proprement parler permettant de traiter de la justification mécanique. Cela peut s'expliquer i) d'une part du fait de l'association récente des fonctions géothermique et mécanique des structures en contact avec le sol, et ii) d'autre part du fait du chargement spécifique induit par la variation "interne" de température de la structure elle-même.

2.2. Première approche

Avant de s'intéresser aux écrans de soutènements énergétiques, il est intéressant d'étudier la problématique des fondations profondes énergétiques. Pour ces géostructures, des approches fondées sur un calcul mécanique d'interaction sol-structure (en utilisant par exemple la méthode aux courbes de transfert t-z, Laloui *et al.*, 2004, Laloui *et al.*, 2011, Burlon *et al.*, 2013) permettent de rendre compte des différents résultats expérimentaux (essais de chargement en vraie grandeur, suivis d'ouvrages réels, Bourne-Webb *et al.*, 2011) et des modélisations numériques plus complexes. Les déplacements verticaux, les efforts normaux additionnels, mais aussi l'évolution de la sécurité vis-à-vis de la portance, peuvent être ainsi correctement appréhendés.

2.3. Application aux écrans de soutènement énergétiques

Pour les écrans de soutènement énergétiques, du fait de l'interaction entre les équilibres verticaux et horizontaux, mais également de leur association à des dispositifs d'appui (radier, butons, etc.), des problématiques complémentaires apparaissent. Il convient, en particulier, de s'intéresser à l'évolution des moments fléchissants, efforts tranchants et déplacements horizontaux, ainsi qu'à l'éventuelle modification de la sécurité vis-à-vis du défaut de butée qui est spécifique à ces ouvrages.

3. Modélisation mise en oeuvre

3.1. Présentation du cas de calcul

Afin d'étudier cette problématique, une configuration simple mais néanmoins jugée représentative d'un écran de soutènement susceptible d'être énergétique a été retenue. Ainsi une paroi moulée énergétique permettant de soutenir une hauteur de 10 m environ a été étudiée, appuyée sur deux niveaux d'appuis (le niveau appui d'inférieur est constitué d'un radier butonnant). Le détail des caractéristiques géométriques (épaisseurs, cotes d'application) est reporté sur la Figure 1.

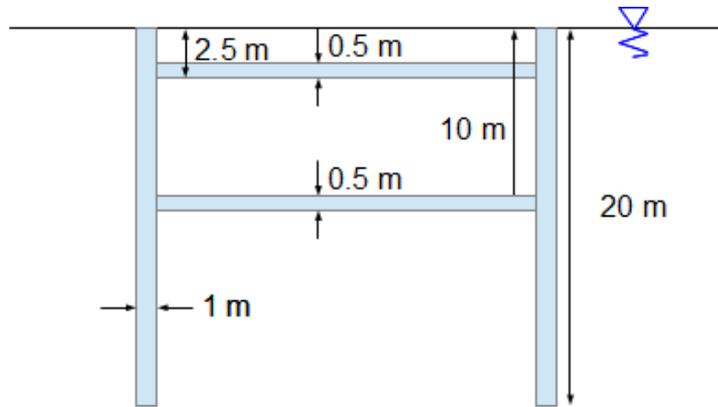


Figure 1. Paroi moulée énergétique étudiée

Le modèle géotechnique envisagé est le suivant :

- sable homogène présentant des caractéristiques mécaniques moyennes : angle de frottement effectif φ' égal à 35° et cohésion effective c' négligeable,
- il est supposé que le niveau d'eau est initialement situé au niveau du terrain naturel, puis rabattu en permanence en phase définitive sous le niveau du radier entre les parois moulées énergétiques.

En absence de géothermie, la justification de la stabilité provisoire de l'écran passe par la réalisation d'une fiche mécanique et hydraulique d'environ 10 m de longueur, qui sera donc retenue dans le calcul.

Dans un second temps l'idée est d'appliquer des variations de température allant de -20 à $+20^\circ\text{C}$, uniquement sur la fiche de l'ouvrage. Ces variations vont au-delà des plages de température couramment et actuellement appliquées (dans la réalité, la température au sein de la paroi reste positive, et il n'y a pas lieu de tenir compte d'éventuels phénomènes de gel). Elles permettent cependant d'apprécier et de caractériser les évolutions liées à la température.

3.2. Détails de la modélisation mécanique

Une modélisation numérique bidimensionnelle en déformations planes est réalisée, en utilisant la méthode des éléments finis (logiciel PLAXIS). Les éléments structuraux sont modélisés par des éléments massifs, afin de permettre l'injection des déformations thermiques. Les lois de comportement suivantes sont retenues :

- le sol est élastoplastique et présente un critère de rupture de Mohr-Coulomb, avec une loi d'écoulement non associée. Par ailleurs, il est supposé que les variations de température restent faibles dans le sol. En conséquence, aucune déformation volumique d'origine thermique du sol n'est considérée ;
- le béton-armé est modélisé en ne considérant que le béton, qui est supposé thermo-élastique et le module de déformation à moyen terme est retenu ;
- des interfaces sont introduites entre la paroi et le sol ;
- les lois de comportement des matériaux ne sont pas modifiées dans ces plages de variations de température (Cekerevac C. et Laloui L, 2004).

Le détail des propriétés mécaniques utilisées est reporté dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés mécaniques

	γ (kN.m ⁻³)	E (MPa)	ν	φ' (°)	ψ' (°)	c' (kPa)	R_{inter}
Béton armé	25	20000	0,25	-	-	-	-
Sol	20	20	0,25	35	5	1	0,67

L'état de contraintes initiales est généré en utilisant le coefficient de pression des terres au repos fourni par la formule de Jaky (procédure K_0). Une représentation globale du modèle (de dimensions 50 x 100 m) et du maillage (éléments triangulaires à 15 nœuds, 1043 éléments, 8796 nœuds et 12516 points de Gauss) est reportée sur la Figure 2.

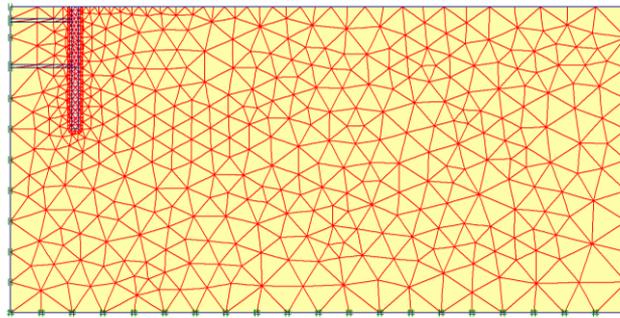


Figure 2. Maillage utilisé

Le projet est ensuite modélisé en considérant le phasage suivant : 1) excavation à 2,5 m de profondeur et pose du niveau de buton supérieur, 2) excavation jusqu'au niveau définitif, 3) mise en place du radier butonnant et finalement 4) application du chargement thermique.

3.3. Application du chargement thermique

Comme un simple calcul mécanique soit réalisé, il s'agit ici d'introduire le chargement spécifique thermique interne à la paroi moulée, se traduisant par des déformations volumiques. Cette étape est réalisée en décomposant la déformation globale $\underline{\underline{\varepsilon}}$ en deux composantes distinctes, i) une composante "élastique" (liée uniquement à l'état de contrainte) et notée $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$ ainsi ii) qu'une composante thermique $\underline{\underline{\varepsilon}}^{th}$ (liée uniquement à la variation de température imposée) (Equation 1)

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^{th} \quad (1)$$

Les variations de température sont supposées homogènes au sein de la fiche de la paroi moulée. Les déformations thermiques dans les autres éléments structurels et dans le sol sont supposées nulles : ce point revient à considérer par exemple que les écoulements sont suffisamment importants pour limiter la diffusion thermique dans les terrains par ailleurs moins bons conducteurs thermiques. Du fait de l'utilisation d'éléments massifs pour modéliser la structure, la composante thermique de la déformation longitudinale induite par la variation de température ΔT est donnée par l'Equation 2.

$$\varepsilon_l^{th} = \alpha_T \Delta T \quad (2)$$

où α_T est le coefficient d'expansion (longitudinale) thermique du matériau constitutif de la paroi moulée (béton et acier), généralement pris égal à $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. L'utilisation de certains logiciels ne permettent que la saisie de la déformation volumétrique ε_V^{th} (thermique), qui peut alors être défini par l'Equation 3.

$$\varepsilon_V^{th} = 3\alpha_T \Delta T \quad (3)$$

4. Résultats et analyse

Les résultats caractéristiques obtenus sont ensuite présentés, en s'intéressant successivement aux déplacements, aux efforts structuraux et à la résistance mobilisée.

4.1. Déplacements horizontaux

Les déplacements horizontaux absolus u et leur variation sous chargement thermique Δu sont présentés sur la Figure 3. Ainsi les déplacements horizontaux additionnels sont quantifiables mais restent très faibles. En particulier, une diminution de température conduit à un très léger déplacement horizontal vers l'aval.

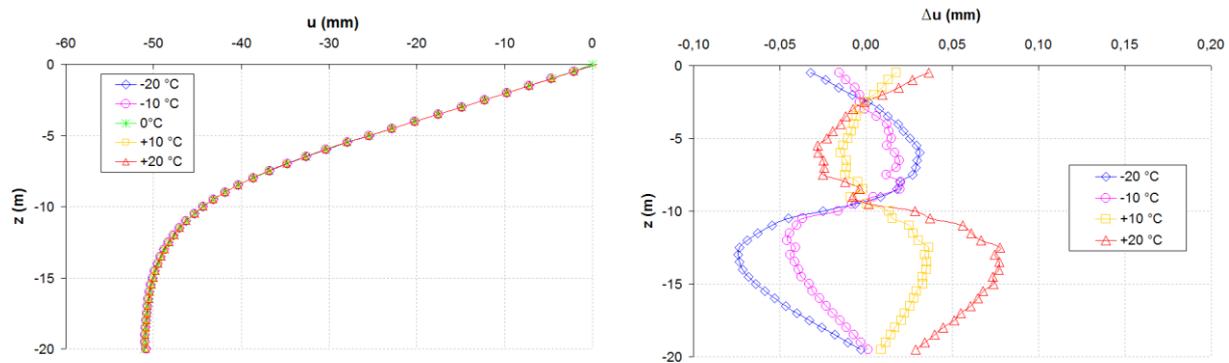


Figure 3. Déplacements horizontaux

4.2. Efforts structuraux

Les moments fléchissants et efforts tranchants sont ensuite étudiés. Du fait de l'utilisation d'éléments massifs, le moment fléchissant peut notamment être obtenu à partir des variations de contrainte verticale σ_v dans une section horizontale en utilisant l'Equation 4.

$$M = \frac{B^3}{12} \left[\frac{\sigma_v(x_1) - \sigma_v(x_2)}{x_1 - x_2} \right] \quad (4)$$

où B est la largeur de la paroi moulée, et x_1 et x_2 deux abscisses distinctes.

Par ailleurs les efforts tranchants peuvent être directement obtenus à partir de la contrainte du cisaillement.

4.2.1 Efforts normaux

Les efforts normaux N et leurs variations sont présentés sur la hauteur de fiche sur la Figure 4 (effort de compression positif). Le comportement caractéristique des géostructures énergétiques est retrouvé: lors du réchauffement de la structure, la dilatation empêchée conduit à une augmentation de l'effort normal. A l'inverse, lors du refroidissement de la structure, la contraction empêchée conduit à une réduction de l'effort normal. En marge de cette analyse, il peut être constaté que les variations d'effort normal restent très faibles, ce qui peut être expliqué par les propriétés d'interface utilisées, déterminées à partir de la seule résistance au cisaillement du sol.

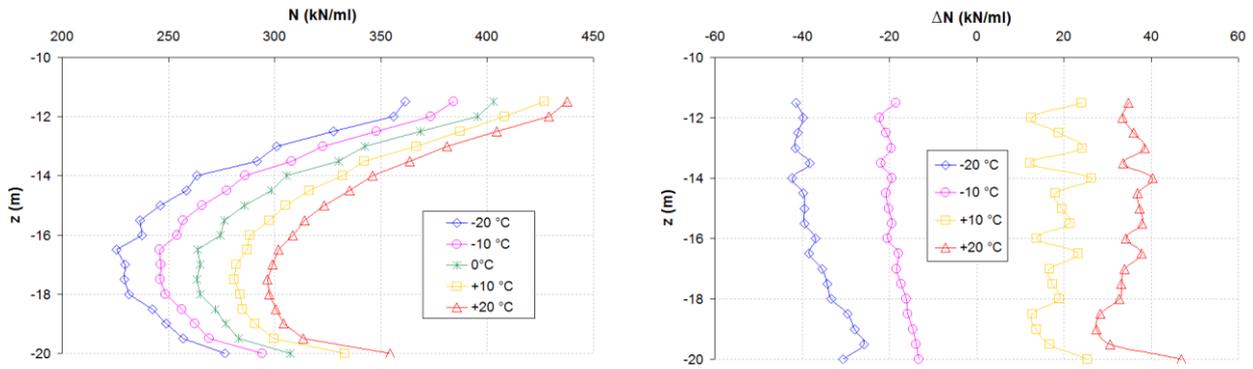


Figure 4. Efforts normaux

4.2.2 Efforts tranchants

Les efforts tranchants T et leurs variations sont présentés sur la Figure 5. Au niveau du radier butonnant, une diminution de température se traduit par une augmentation de l'effort tranchant. L'effort tranchant maximal reste peu affecté par le chargement thermique.

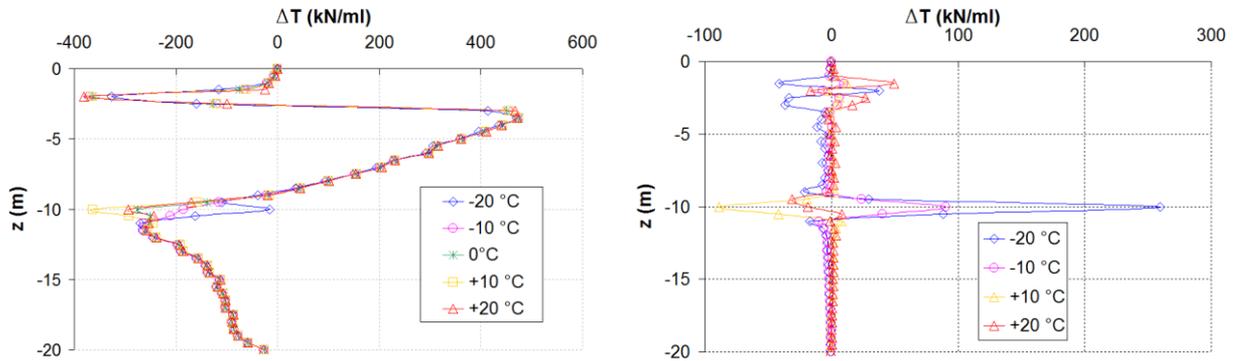


Figure 5. Efforts tranchants

4.2.3 Moments fléchissants

Les moments fléchissants M et leurs variations sont présentés sur la Figure 6 (un moment fléchissant positif correspondant à une fibre comprimée côté terre).

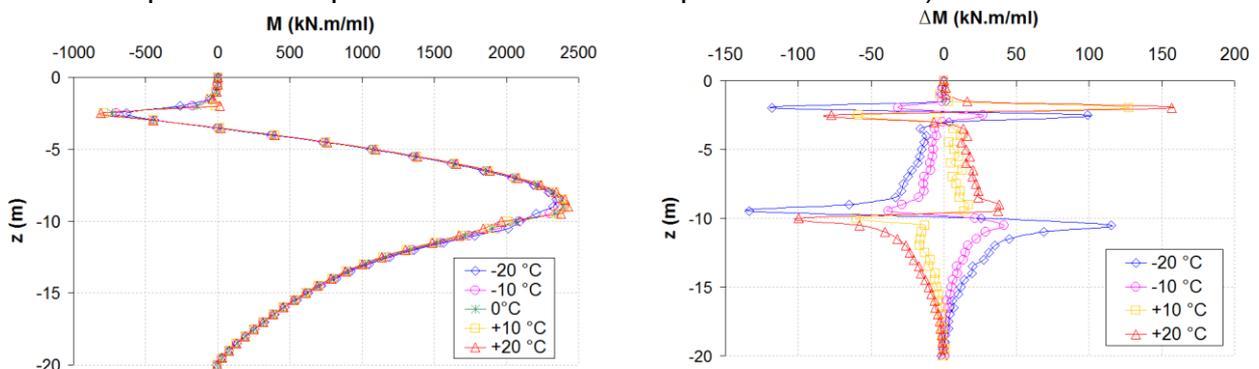


Figure 6. Moments fléchissants

Les variations de moments évoluent de façon monotone avec la température. Au niveau du moment fléchissant maximal, la variation de moment fléchissant maximal augmente est égale à environ 5 % pour une différence de température de 20°C.

4.3 Mobilisation de la résistance géotechnique

La contrainte de butée mobilisée et sa variation sur la hauteur de fiche sont présentées sur la Figure 7.

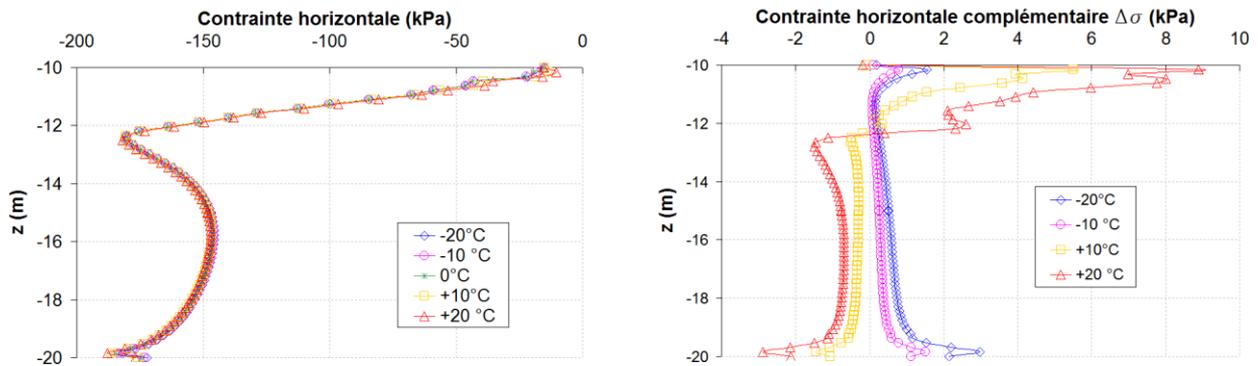


Figure 7. Contrainte de butée mobilisée

La butée globale mobilisée est finalement reportée dans le Tableau 2 et indique la faible mobilisation complémentaire de l'effort de butée.

Tableau 1. Propriétés mécaniques

dT (°C)	-20	-10	0	10	20
$R_{p,mob}$ (kN/ml)	1774	1778	1782	1781	1779
D (%)	-0,44%	-0,22%	-	-0,04%	-0,15%

5. Proposition de règles de justifications

Le processus de justification doit s'appuyer sur deux étapes distinctes : i) la capacité à reproduire le comportement des écrans de soutènements énergétiques et ii) la mise en oeuvre de justifications spécifiques.

5.1 Modélisation pratique des écrans de soutènements énergétiques

Il apparaît ainsi que l'effet des chargements thermiques sur le comportement horizontal des écrans est quantifiable. Il affecte cependant de façon limitée le dimensionnement mécanique. Une approche concentrée sur l'étude du comportement vertical de la paroi apparaît donc dans un premier temps suffisant pour appréhender le comportement de ces ouvrages. A ce sujet, la connaissance du champ de température réel (supposé homogène dans l'approche présentée, simplifiée mais conservatrice) permettrait un certain raffinement des calculs. Par ailleurs, cela légitime une démarche similaire à celle formulée pour les fondations profondes énergétiques.

En parallèle, il apparaît délicat d'étudier les comportements vertical et horizontal de l'ouvrage dans un unique calcul. En effet les hypothèses retenues pour étudier le comportement horizontal de la paroi conduisent à des valeurs de frottement paroi-sol axial très faibles. Cela se traduit par une sous-estimation des efforts structuraux additionnels générés par les variations de température.

5.2 Justification

Dans un second temps, les résultats de la modélisation permettent de justifier l'ouvrage sous chargement thermique. L'idée est ici de suivre les mêmes règles (même vérifications - en apportant une attention particulière aux problématiques d'étanchéité le cas échéant -, même facteurs partiels de sécurité, etc.) que pour les écrans de soutènement classiques.

Afin de justifier l'ouvrage, les résultats obtenus lors de la phase de modélisation précédente peuvent être considérés comme les valeurs caractéristiques de l'effort thermique et introduites dans les diverses justifications (Habert et Burlon, 2012).

5.3 Points divers

Dans le cas d'écran travaillant en traction (radier étanche sous la nappe), et afin de ne pas surestimer les efforts, il peut être tenu compte dans la modélisation de la limitation de la résistance en traction du béton.

Par ailleurs, dans le cas de parois équipées toute hauteur, les tubes caloporteurs sont généralement installés uniquement sur la face côté terre : cela induit des gradients de température horizontaux. Dans ce cas, le torseur moyen des efforts peut être obtenu comme décrit précédemment, en considérant l'évolution de température moyenne dans les différentes sections horizontales. Les justifications de la structure peuvent être réalisées en introduisant a posteriori les efforts spécifiques induits par le gradient thermique (ce qui constitue la démarche courante pour les structures non thermoactives).

6. Conclusion

Le comportement des écrans de soutènement énergétiques a été étudié avec une modélisation numérique d'une configuration type. Après analyse des résultats obtenus et des ordres de grandeur i) des déplacements complémentaires, ii) des efforts structurels additionnels et iii) de la modification de la résistance géotechnique, des recommandations pour la modélisation ainsi la justification de ces ouvrages ont été proposées.

7. Références bibliographiques

- Bardoneschi B., Bernard JB. (2014). Captage géothermique en parois moulées de stations de métro, <http://conseils.xpair.com>.
- Bourne-Webb P.J., Amatya B., Soga K., Amis T., Davidson C., Payne P.(2009). Energy pile test at Lambeth College, London. *Geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles*, *Geotechnique*, vol. 59, no. 3, 237-248.
- Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, vol. 56, no. 2, pp. 81–122.
- Cekerevac C. et Laloui L, 2004, Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 28, pp. 209-228.
- Habert J. et Burlon S. (2012). Eléments sur le comportement mécanique des fondations géothermiques. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (2)*, pp. 617-624.
- Laloui L., Moreni M., Vuillet L. (2003). Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*, vol 40 n° 2, pp. 388–402.
- Laloui L., Di Donna A. (2011). Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Civil Engineering* n° 164, pp. 184-191.
- Suryatriyastuti M., Mroueh H., Burlon S., Habert J. (2013). Discussions about the bearing capacity of thermoactive piles. *Actes 18th ICSMGE, Paris*, pp. 3407-3410.