

MODELISATION D'UN SYSTEME D'INTERACTION SOL-PIEU-STRUCTURE POUR UN GROUPE DE PIEUX GEOTHERMIQUES

SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION MODEL FOR ENERGETIC PILE GROUP

Cyril BORELY¹, Fahd CUIRA¹, Umur Salih OKYAY¹
¹ Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une étude de l'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques sous sollicitations thermomécaniques. Ce modèle permet de représenter la dépendance entre un groupe de pieux et une structure à l'aide d'une matrice de rigidité. Une approche simplifiée pour déterminer cette matrice de rigidité à partir d'un modèle de plaque équivalente est proposée dans cet article.

ABSTRACT – This paper presents a soil-pile-structure interaction model for energetic pile group under thermomechanical load. In this model, a rigidity matrix is used to represent dependencies between piles induced by above structure. This paper proposes a simplified approach to evaluate rigidity matrix using an equivalent plate model.

1. Introduction

Les pieux géothermiques sont des pieux équipés de pompes à chaleur connectés à un circuit thermique fermé. Ces pieux sont utilisés comme source d'énergie pour le chauffage et/ou le refroidissement des bâtiments.

Pour un système de pieux géothermiques relié à un ouvrage, il est nécessaire de prendre en compte l'interaction entre le changement de température et les efforts et déplacements induits : un pieu géothermique qui se refroidit provoque des efforts de traction tandis que le pieu géothermique se réchauffant provoque des efforts de compression, aussi bien dans le pieu lui-même que sur la structure au-dessus. En fonction des conditions limites appliquées aux pieux et de la rigidité de la structure, les efforts générés sont distribués entre le sol et la structure. Ces différentes interactions peuvent modifier la descente de charge de la structure, générer des tassements différentiels et donc affecter le comportement mécanique de l'ensemble.

2. Interaction sol-pieu-structure

Cette étude présente le comportement thermomécanique de groupes de pieux géothermiques en interaction avec la structure associée. Un modèle semi analytique représentant le comportement de l'ensemble sol-pieux géothermiques-structure sous sollicitations thermiques a été développé. Ce modèle fonctionne en interaction avec Taspie+, un logiciel développé par Terrasol (Cuirra et Simon, 2009) simulant un pieu (ou maille de pieux) sous chargement mécanique vertical.

2.1. Modèle de pieu géothermique

Le pieu est représenté par un modèle de poutre simple (loi de Hooke) auquel est ajouté un terme de déformation thermique :

$$\frac{\partial(u - u_0)}{\partial x} = -\frac{N - N_0}{ES} + \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

Où, l'état « 0 » représente l'état initial du pieu avant l'application du chargement thermique (un chargement mécanique ayant déjà été appliqué) et :

- u est le tassement du pieu (m) ;
- N est l'effort axial dans le pieu (kN) ;
- ES est la rigidité axiale du pieu avec E le module de Young du pieu et S sa section ;
- T est la température imposé au pieu (K) ;
- α est le coefficient de dilatation thermique (K^{-1}), 10^{-5} usuellement pour le béton.

2.2. Modèle d'interaction sol-pieu

L'interaction entre le sol et le pieu est représentée par une loi de comportement élastoplastique de type « t-z » (loi de mobilisation type Frank et Zhao, 1982). Cette interaction est décrite en deux parties :

- Au long du fût du pieu, le frottement latéral mobilisé entre pieu et sol (τ) est relié directement au tassement du pieu à l'aide d'une loi de type « t-z » prenant en compte chargements et déchargements (Figure 1.) donnant lieu à l'équation suivante (où P est le périmètre de la section du pieu) :

$$\frac{\partial N}{\partial x} = -P\tau(u) \quad (2)$$

- En pointe de pieu, la contrainte mobilisée (σ_p) est aussi représentée par une loi de type « t-z » prenant aussi en compte chargements et déchargements (Figure 1.) à l'exception prêt qu'aucun effort de traction ne peut être mobilisé. La condition limite en pointe de pieu est donc la suivante (avec L la longueur du pieu) :

$$N(z = L) = N_p = S\sigma_p(u) \quad (3)$$

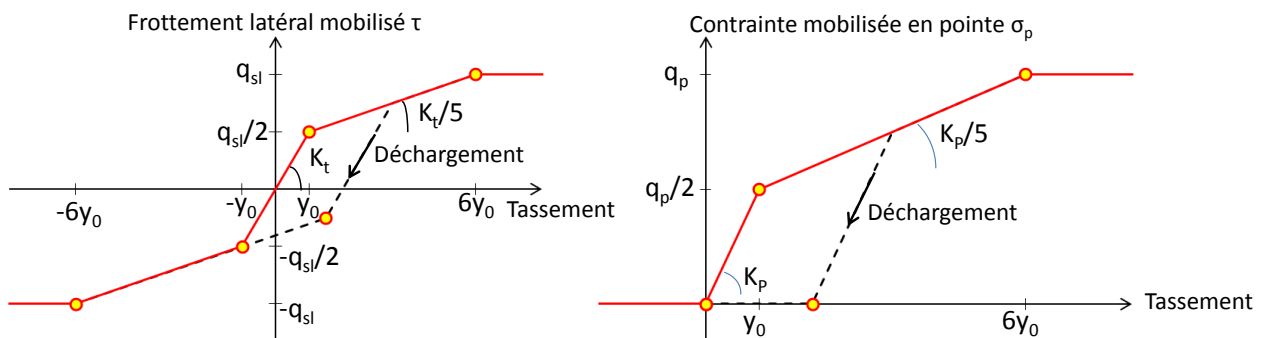


Figure 1. Modèles de frottement latéral mobilisé (à gauche) et de contrainte mobilisée en pointe (à droite) avec chargements et déchargements (Frank et Zhao, 1982)

2.3. Modèles de structure

Dans ce modèle d'interaction, deux phases sont considérées. En premier, un chargement mécanique est appliqué en tête de chacun des pieux (phase « 0 »), puis une phase thermique où la structure est représentée sous forme de rigidités en tête des pieux (modèle de ressort ou modèle de matrice de rigidité). Deux modèles d'interaction sont présentés ci-dessous.

2.3.1. Modèle avec matrice de rigidité

Dans le cas des ouvrages classiques, les éléments structuraux sont dimensionnés pour avoir un comportement linéaire élastique en état de service. Ainsi, pour une structure, une relation linéaire peut être établie entre le déplacement des fondations du bâtiment et leur sollicitation verticale sous forme d'une matrice de rigidité, qui est introduite dans le modèle en tête du groupe de pieux :

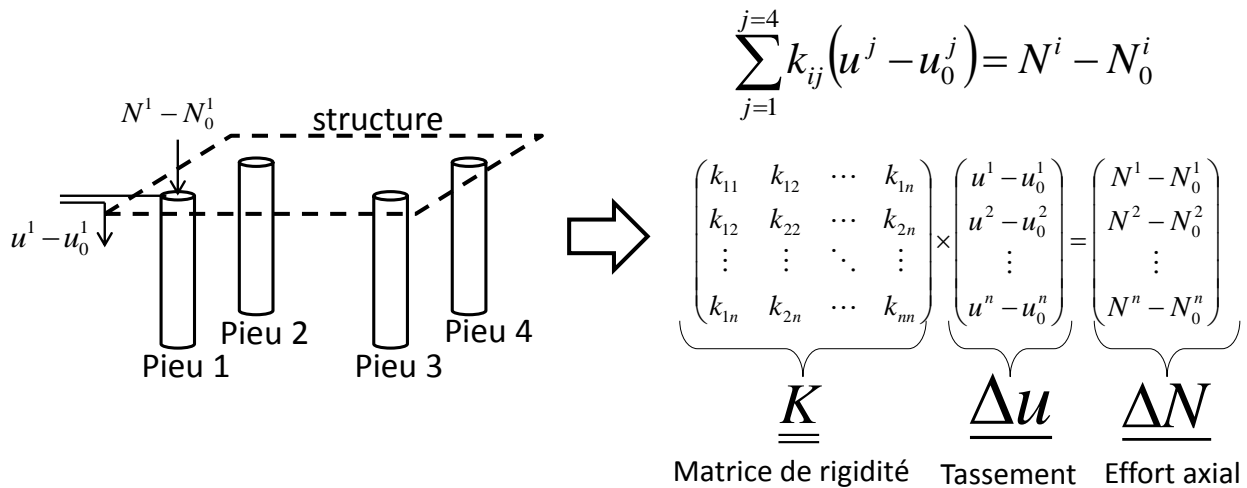


Figure 2. Modèle avec matrice de rigidité

L'obtention de la matrice de rigidité globale d'une structure n'est pas chose aisée, elle nécessite d'effectuer un modèle aux éléments finis de la structure et d'effectuer des calculs individuels pour chaque appui de la structure.

Or, dans le cas d'ouvrages courants, un modèle aux éléments finis de la structure n'est pas usuellement établi. Il peut donc être envisageable d'obtenir une matrice de rigidité simplifiée de la structure en modélisant, à partir des plans, la structure en 2D comme une plaque équivalente. Dans la plupart des cas, il suffira de déterminer les rigidités équivalentes pour un seul niveau de structure sur le groupe de pieux. Au-delà, la structure a peu d'influence sur le comportement global car les premières interactions auront lieu au premier niveau de structure fondé sur les pieux. Chaque élément structural est amené à l'échelle de la plaque (2D) pour être représenté avec un produit d'inertie équivalente, EI.

2.3.2. Modèle de ressort

La structure peut aussi être représentée dans la phase thermique sous forme de ressort de rigidité « k » en tête de chacun des pieux. Il est à noter que le ressort n'établit un lien qu'entre les incréments de tassement et d'efforts en tête provoqués par la charge thermique.

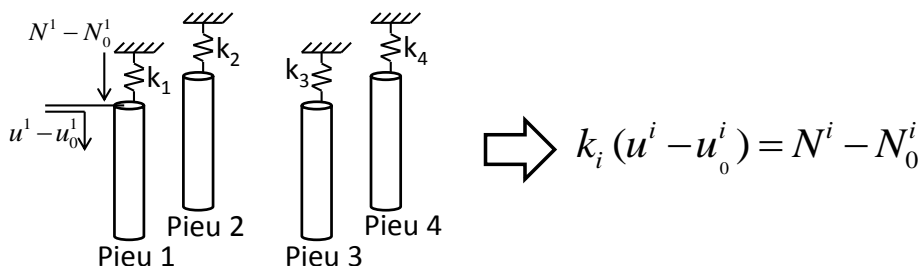


Figure 3. Modèle de ressort

Dans ce modèle de ressort, aucune interaction entre les pieux n'est considérée, les pieux sont donc indépendants les uns des autres. Pour simuler un pieu bloqué en tête, il suffit d'appliquer un ressort de rigidité très important en tête des pieux ($k=\infty$). Pour un pieu libre en tête, un ressort de rigidité nulle ($k=0$) est appliqué en tête.

Ce modèle est valable dans le cas de pieux individuels, mais dans le cas d'un ouvrage sur un groupe de pieux, ce modèle ne prend pas en compte l'interaction entre les pieux et l'ouvrage contrairement au modèle de structure précédent utilisant d'une matrice de rigidité en tête des pieux.

2.4. Résolution du modèle

Les pieux sont discrétisés sous formes d'éléments linéiques 1D. Les équations (1) et (2) peuvent donc conduire à un système global matriciel.

Cependant l'interaction entre les pieux et le sol est représentée par un comportement élastoplastique. La résolution de ce système suit alors un processus itératif jusqu'à atteindre convergence de la solution.

3. Etude de cas

Dans cet article, le modèle d'interaction sol-pieu-structure est appliqué au cas d'un projet d'usine de traitement des eaux fondée sur des pieux géothermiques (Sept-Sorts, France, Figure 4.).

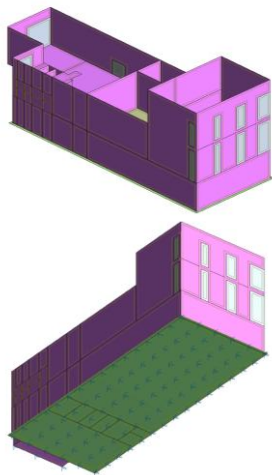


Figure 4. Sept-Sorts, Modèle 3D du bâtiment

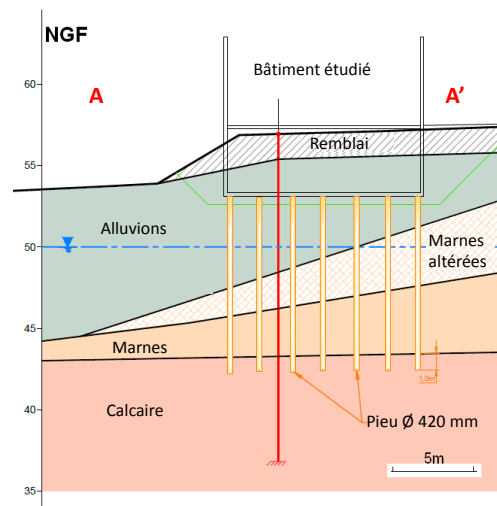


Figure 5. Sept-Sorts, coupe stratigraphique

Le bâtiment étudié est fondé sur 102 pieux de longueur 11m et de diamètre 420 mm. Ces pieux traversent un sol avec un fort pendage pour venir s'ancrer (de 50 cm environ) dans un substratum rocheux calcaire (Figure 5.). Parmi ces 102 pieux, une rangée sur deux environ (44 pieux, voir Figure 6.) est constituée de pieux géothermiques (équipés d'un circuit caloripporteur).

Les efforts et déplacements en tête de pieux (et donc de la structure au-dessus) sont examinés au droit de deux sections, une « section rigide » (AA') située sous un voile extérieur du bâtiment et une « section souple » (BB') située sous le radier (Figure 6.).

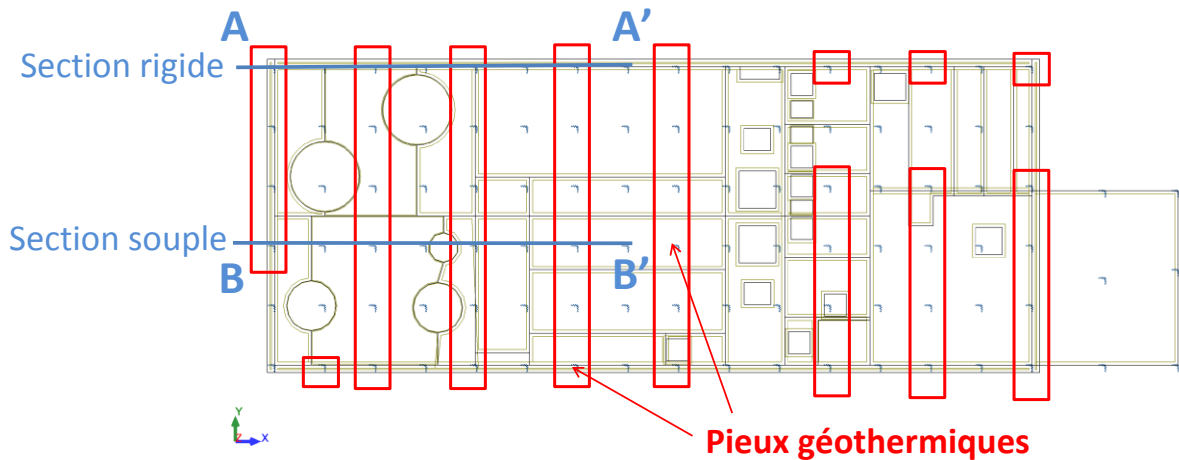


Figure 6. Sept-Sorts, 102 pieux dont 44 géothermiques

4. Analyse de l'interaction

4.1. Modèles de structure

Cinq modèles de structure sont étudiés :

- Modèle 1 « Matrice globale » (Modèle de référence) : La structure est représentée par une matrice de rigidité générée par l'entreprise PINTO à partir d'un modèle aux éléments finis à la suite de 102 calculs (chaque calcul correspond à la sollicitation par un chargement unitaire d'une fondation). Il s'agit du modèle principal de référence.
- Modèle 2 « Matrice simplifiée » : La structure est représentée par une matrice de rigidité simplifiée, cette matrice est obtenue en modélisant uniquement le radier et les voiles du bâtiment (rez-de-chaussée uniquement) en 2D par une plaque de rigidité équivalente (Figure 7.).
- Modèle 3 « Ressort » : La structure est modélisée par des ressorts en tête de chaque pieu, la rigidité de ces ressorts correspond aux termes diagonaux de la matrice de rigidité utilisée dans le modèle 1. Les ressorts ne sont pas interconnectés.
- Modèle 4 « Bloqués » : Les pieux sont bloqués en tête (modèle de ressort $k=\infty$).
- Modèle 5 « Libres » : Les pieux sont libres en tête (modèle de ressort $k=0$).

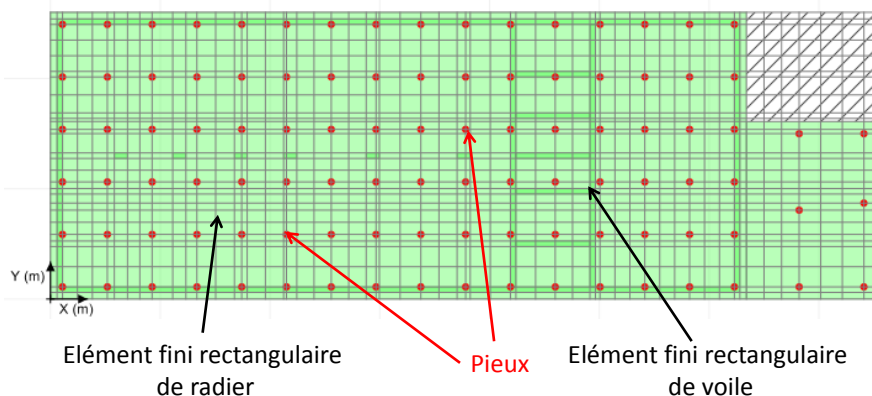


Figure 7. Eléments finis rectangle de plaques pour le Modèle 2 « Matrice simplifiée »

La répartition des pieux géothermiques correspond à une rangée de pieux sur deux (Figure 6.). Après avoir appliqué un chargement mécanique au droit de tous les pieux, un chargement thermique de $T - T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ est appliqué à tous les pieux géothermiques.

4.2. Résultats

Les graphiques ci-dessous montrent les déplacements et efforts en tête de pieux des cinq modèles, uniquement liés au chargement thermique, pour chacune des sections (la section souple BB', Figure 9. et la section rigide AA', Figure 10.).

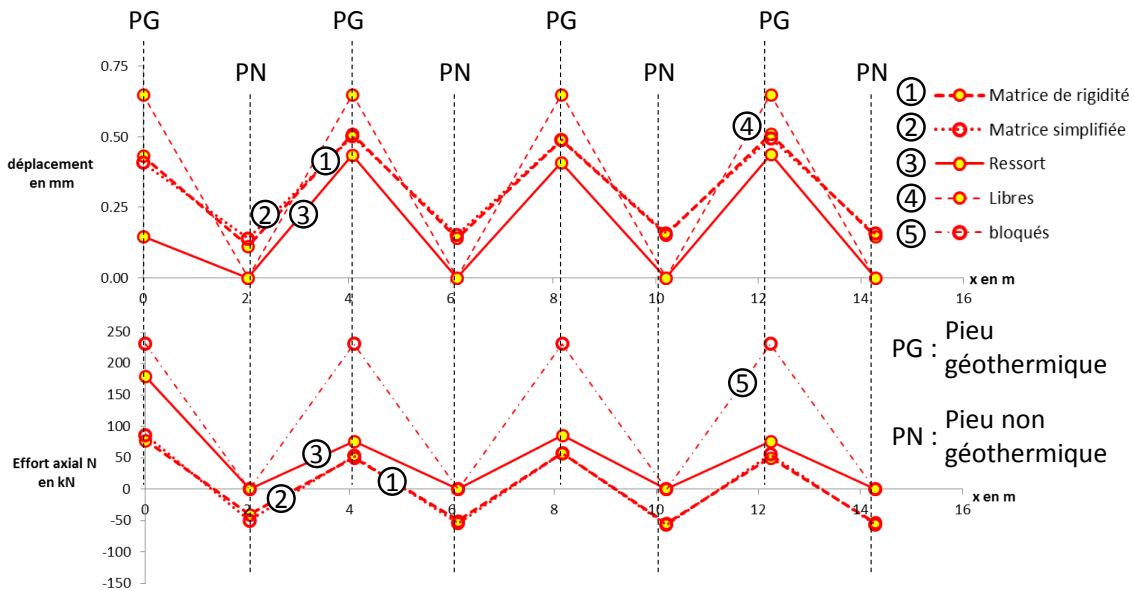


Figure 9. Déplacements (en haut) et sollicitations (en bas) en tête des pieux de la section souple (BB') pour les 5 modèles structuraux

Le modèle 1 (avec matrice de rigidité provenant d'un modèle structure) est comparé aux autres modèles. Le modèle considérant les pieux bloqués en tête (Modèle 5) surestime les efforts dus au réchauffement des pieux tandis que le modèle avec pieux libre en tête (Modèle 4) surestime les déplacements.

Seul le modèle 2 avec une matrice obtenue de manière approchée (à l'aide d'une simplification du bâtiment en modèle de plaque équivalente) permet d'avoir des résultats proches voire identiques au modèle 1 en particulier pour la section souple (Figure 9.).

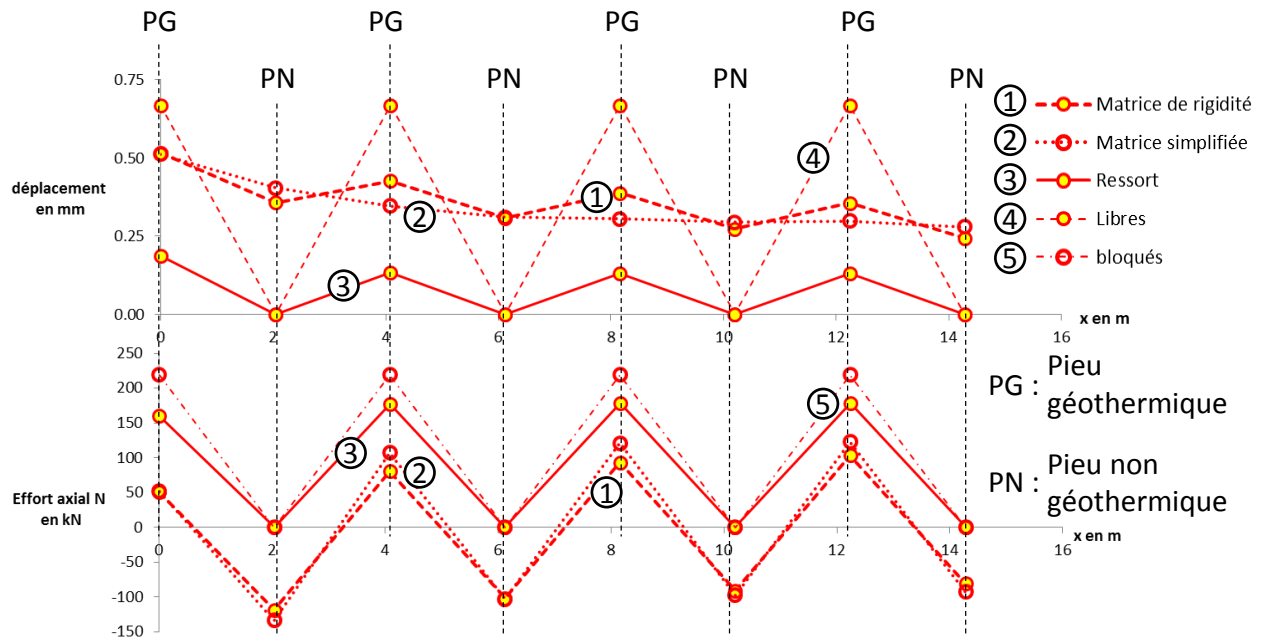


Figure 10. Déplacements (en haut) et sollicitations (en bas) en tête des pieux de la section rigide (AA') pour les 5 modèles structuraux

Dans le modèle de ressorts (modèle 3), ainsi que les modèles avec pieux libres ou bloqués en têtes (modèles 4 et 5), les pieux ont des comportements indépendants les uns des autres, par conséquent les pieux non géothermiques (ou normaux) ne sont pas impactés par le comportement des pieux géothermiques. Seuls les modèles utilisant une matrice de rigidité pour la structure (modèle 1 et 2) permettent de représenter le comportement complexe de la structure avec une interaction entre l'ensemble des pieux.

Dans le cas des pieux qui se situent sous un élément rigide de la structure (voiles périphériques de l'ouvrage, coupe AA', Figure 10.) l'interaction entre les pieux se traduit par l'entraînement des pieux non équipés par le déplacement des pieux géotechniques accompagné d'un changement important des charges sur les pieux (augmentation de la charge pour les pieux géothermiques et diminution pour les pieux normaux). Dans le cas d'une interaction plus souple des pieux sous le radier de la structure (coupe AA', Figure 9.), les pieux normaux sont moins entraînés, le changement d'effort en tête des pieux est donc moins important par rapport au cas rigide.

Lors de la phase de chargement thermique des pieux, le chargement global de la structure ne change pas (son poids reste le même), par conséquent tout incrément d'effort en tête des pieux géothermiques lors du chargement thermique se traduit par une diminution d'effort en tête de pieux voisins satisfaisant la condition d'équilibre de la structure (n étant le nombre de fondations) :

$$\sum_{i=1}^{i=n} (N^i - N_0^i) = 0 \quad (1)$$

Les résultats des calculs mettent en évidence que, pour une bonne représentation de la problématique, cette interaction sol/pieu/structure doit être traitée avec la prise en compte d'une matrice interconnectée en tête du groupe de pieux.

5. Conclusions

Cet article présente un modèle d'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques. Les pieux sont représentés par des éléments linéiques en 1D, l'interaction sol-pieux par des modèles de types « t-z » et le comportement pieu-structure par une matrice de rigidité. Ce modèle complet permet de représenter l'interdépendance entre différents pieux due au comportement mécanique de la superstructure. La dilatation et la contraction d'un pieu géothermique génèrent des sollicitations dans la structure se transmettant à l'ensemble des pieux. Seul un modèle complet intégrant tous les pieux et la structure permet de traiter ce problème avec précision.

Cependant l'obtention d'une matrice de rigidité n'est pas une tâche aisée et courante dans le cas des structures les plus classiques. Notre étude a montré qu'une méthode simplifiée évaluant la matrice de rigidité à partir d'une représentation simplifiée de l'ouvrage en une plaque équivalente en 2D peut remplacer la détermination fastidieuse de la matrice de rigidité globale de l'ouvrage. Cette méthode simplifiée aboutit à des résultats proches de modèles plus sophistiqués.

6. Références bibliographiques

- Frank R., Zhao S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins, *Bul. Liaison Labo P. Et Ch.*, 119, pp 17-24.
- Cuira F., Simon B. 2009. Deux Outils simples pour traiter des interactions complexes d'un massif renforcé par inclusions rigides, *17th ICSMGE, 5-9 October, Alexandria, Egypt*, pp 1163-1166.
- Habert J., Burlon S. (2012). Elements on mechanical behavior of heat exchanger piles. *ACTES de Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (2), 4-6 July 2012, Bordeaux, France*, pp 617-624.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (1991). *The finite Element Method*, McGraw-Hill book Company, 4th edition, UK.