



Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement

Antoine Fromentin¹ - Daniel Pahud¹

Lyesse Laloui² - Matteo Moreni²

¹ *Laboratoire de systèmes énergétiques
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1015 Lausanne, Suisse*

² *Laboratoire de Mécanique des Sols
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1015 Lausanne, Suisse*

RESUME. Des pieux échangeurs sont des pieux de fondation transformés en échangeurs de chaleur pour servir à des fins de chauffage et/ou de refroidissement. La conception de systèmes avec pieux échangeurs est décrite en détail et la problématique liée aux effets thermiques et mécaniques est exposée. Un modèle de simulation numérique, développé et validé sur la base de mesures d'installations existantes, est présenté. Une méthodologie est établie pour la détermination des nombreux paramètres qui interviennent dans la simulation de telles installations. Sur la base de l'analyse d'un système type, un ensemble de recommandations sont déduites, de même que des règles pour pré-dimensionner un avant-projet. Les influences des sollicitations thermiques sur le comportement mécanique des pieux sont discutées. Cette étude ne concerne que des installations dans des couches géologiques saturées.

Une étude de faisabilité technique d'une installation avec pieux échangeurs est présentée à titre d'exemple. Elle montre la difficulté d'établir un ensemble de règles valables en toute généralité pour un dimensionnement des installations thermiques, et confirme la nécessité de pouvoir disposer d'un outil de simulation numérique de ce genre de système. L'influence des sollicitations thermiques sur la statique du pieu est également estimée et montre que dans ce cas précis, la portance du sol n'est que faiblement diminuée.

ABSTRACT. Heat exchanger piles are foundation piles which can be used to transfer heat with the surrounding ground for heating and/or cooling purpose. The design of heat exchanger pile systems is described in detail and the problematic related to the thermal and mechanical effects is exposed. A numerical simulation model, developed and validated against measurements of existing installations, is presented. A methodology is established for the determination of the numerous parameters which are required for the simulation of such

systems. Based on the analysis of a typical system, a set of recommendations and rules for the sizing of a pre-project are deduced. The influence of thermal solicitations on the mechanical behaviour of the piles are discussed. This study deals only with installations built in water saturated ground layers.

A technical feasibility study of a heat exchanger pile system is presented. It highlights the difficulty in establishing a set of rules for the design of the thermal installation which is valid for any case. It confirms the necessity of being able to use a numerical simulation tool for such systems. The influence of the thermal solicitations on the static of the pile is also estimated and shows that in the particular case, the carrying ability of the ground is only slightly diminished.

MOTS-CLES : *Pieu échangeur, comportement thermo-mécanique, méthode de dimensionnement, fondations profondes.*

KEY WORDS : *Heat exchanger pile, thermo-mechanical behaviour, design method, deep foundation, foundation pile.*

1. Introduction

1.1. Contexte général

Les problèmes liés à l'utilisation de l'énergie feront incontestablement partie des grandes questions du 21ème siècle. En effet, l'augmentation de la population et une tendance à l'accroissement du niveau de vie général pourraient avoir pour conséquence directe une progression inéluctable de la consommation mondiale d'énergie primaire. Et si à court et moyen termes un épuisement des réserves énergétiques n'est pas à craindre, il n'en va pas de même des impacts environnementaux liés à leur utilisation. L'effet de serre en est un exemple très médiatisé. Même si certaines controverses existent sur ses conséquences, l'augmentation anthropogène colossale de la concentration de CO₂ ne peut pas, elle, être mise en doute. Les moyens possibles pour remédier à cet état de fait sont d'une part une utilisation rationnelle de l'énergie et d'autre part un recours accru aux énergies renouvelables ; les systèmes basés sur des pompes à chaleur (PAC), et plus particulièrement ceux intégrant des pieux échangeurs, répondent à ces objectifs.

Un pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le terrain. Ses deux principales fonctions sont donc de reporter en profondeur les charges d'une construction et de servir d'échangeur de chaleur avec le terrain. Un réseau de pieux de fondation est mis en oeuvre lorsque le sol en surface n'a pas une résistance suffisante pour supporter les charges de l'ouvrage par l'intermédiaire de fondations superficielles. D'une longueur unitaire pouvant varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, une partie ou la totalité des pieux peuvent être équipés en "échangeurs de chaleur" sans surcoûts excessifs, ce qui constitue un avantage par rapport à la réalisation de sondes géothermiques. Le système de pieux échangeurs (cf. figure 1), généralement

raccordé à une pompe à chaleur (PAC), permet d'extraire la chaleur du terrain pour satisfaire des besoins de chaleur en hiver et d'y rejeter des charges thermiques issues de la production de froid en été.

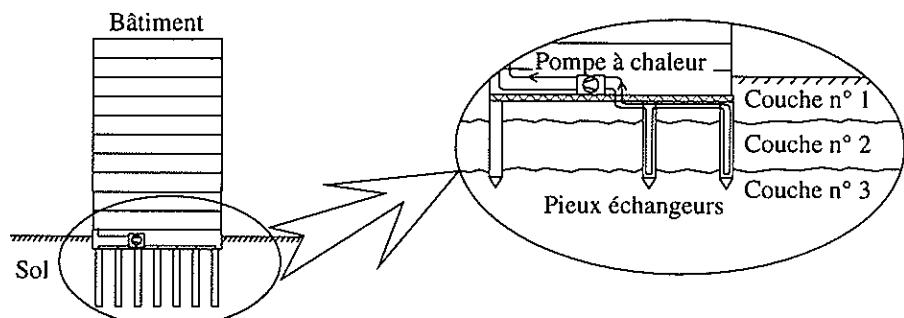


Figure 1. Schéma d'un système de chauffage avec pieux échangeurs. Schematic view of a heat exchanger pile system.

1.2. Problématique

La réalisation d'installation avec pieux échangeurs est relativement récente [SCH 93, FRO 97] et leurs caractérisations thermique et statique demandent encore à être améliorées. Les deux problèmes principaux auxquels est confrontée cette technologie sont, d'une part, le comportement statique des pieux et de l'ensemble pieux - bâtiment soumis à des sollicitations thermiques, et d'autre part le comportement thermique de l'ensemble pieux - terrain.

En ce qui concerne le comportement mécanique des pieux, les déplacements et/ou contraintes supplémentaires liés aux sollicitations thermiques pourraient provoquer une diminution des forces d'adhésion à l'interface sol - pieu, un moment de flexion dans le pieu ou encore des contraintes inadmissibles dans la structure même du bâtiment.

En ce qui concerne l'aspect thermique, le problème vient d'une modification de la température d'équilibre du terrain ; une diminution trop prononcée de cette dernière diminue le coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur. Au pire des cas, on pourrait également arriver au gel du pieu, avec endommagement de ce dernier, ce qui n'est évidemment pas acceptable.

Bien que déjà utilisée dans des réalisations de tailles certaines (une tour de 199 m en voie d'achèvement à Frankfurt/Main, utilise ce procédé), le dimensionnement de telles installations nécessite encore quelques précautions. Le but de cet article est de présenter un état des connaissances dans ce domaine qui sera suivi d'une brève présentation d'une étude de cas concernant le projet d'un nouveau bâtiment du département d'architecture sur le site de l'Ecole Polytechnique Fédérale de

Lausanne [FRO 98]. Le chapitre 2 abordera une description du concept du pieu échangeur. Le comportement thermique d'un système avec pieux échangeurs, la simulation thermique et la problématique liée à la mécanique des pieux fera l'objet du chapitre 3. Pour les aspects thermiques, outre la validation d'outils de prédition numérique, nous proposons une démarche pour le pré-dimensionnement d'ouvrages types. Le chapitre 4 donne à titre d'illustration un exemple d'étude de faisabilité de pieux échangeurs. Cette étude ne concerne que des installations dans des couches géologiques saturées.

2. Description

2.1. Système

Pour le chauffage, un système avec pieux échangeurs comprend généralement les éléments suivants (cf. figure 2) :

- Des pieux proprement dits (A).
- Des collecteurs (B).
- Des tuyaux de liaison (C).
- Une ou plusieurs pompes à chaleur (D).
- Un stockage tampon (E), afin d'éviter un fonctionnement pendulaire des PAC.

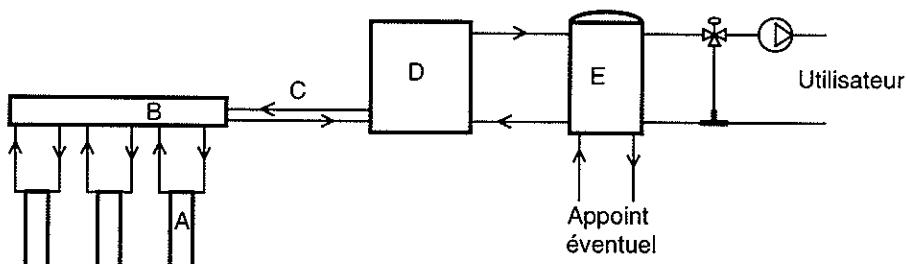


Figure 2. Schéma de principe d'un système avec pieux échangeurs. Schematic layout of a heat exchanger pile system.

Pour la production de froid, deux variantes existent, en fonction du niveau de température souhaité ; soit par une machine de froid (à la place de la PAC), soit par refroidissement direct (free cooling) où la chaleur excédentaire est simplement injectée dans le terrain par le biais des pieux.

Dans beaucoup de cas, la même installation est prévue pour la production alternée de chaleur et de froid ; ceci est hautement souhaitable en ce qui concerne l'évolution à long terme de la température du terrain. Par analogie, un puits plus ou moins réalimenté en fonction de la nature du sol s'assèche si trop d'eau est soutirée. Il en va de même du terrain aux alentours des pieux échangeurs.

Selon les besoins en chaleur (ou en froid) et la longueur totale des pieux à disposition, ce genre de système ne peut pas couvrir à lui tout seul les besoins en énergie ; on a alors recours à une source d'énergie d'appoint, et on parle de "système bivalent"¹.

Ce système bivalent est "idéal" du point de vue technico-économique. Il est capable de fournir alternativement de la chaleur et du froid.

Une régénération thermique du terrain peut être envisagée en été (par capteurs solaires, rejets thermiques, etc.), de manière à remettre dans le terrain une quantité d'énergie thermique comparable à celle qui est prélevée en hiver. Lors de la recharge thermique du terrain, il pourrait arriver que la température du fluide caloporteur dans le pieu atteigne accidentellement une valeur trop élevée. Cette problématique est abordée dans le chapitre 4.

2.2. Pieu

Pratiquement, à l'exception de ceux en bois, toutes les sortes de pieux peuvent être équipés en échangeurs ; cela va des pieux préfabriqués, creux et battus de tout diamètre (voir figure 3).

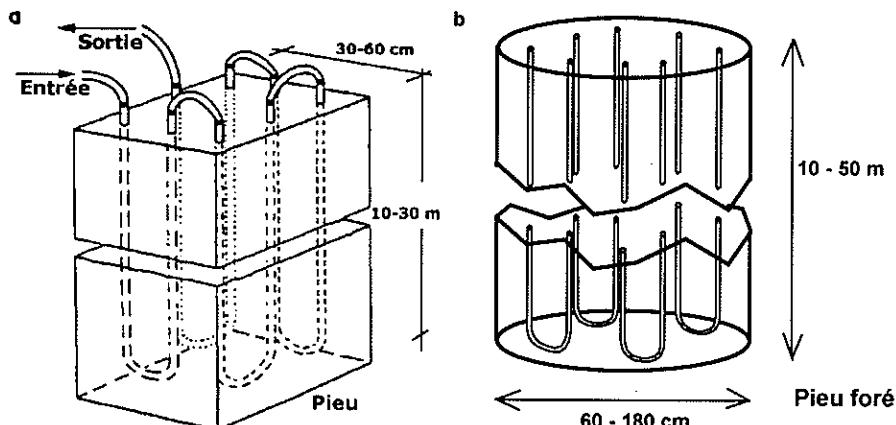


Figure 3. Exemple de pieux échangeurs ; a) pieu préfabriqué battu, b) pieu foré. Heat exchanger pile examples ; a) hammered precast pile, b) cast-in-place pile.

¹ Un système bivalent est un système qui utilise deux vecteurs énergétiques ; dans notre cas, les besoins de base sont couverts par les pieux échangeurs et l'appoint par une autre forme d'énergie.

Afin d'échanger la chaleur avec les pieux, le fluide caloporteur est véhiculé dans des tuyaux en forme de U, généralement en polyéthylène ; ce matériau est choisi en raison de son coût relativement bas et pour sa facilité de mise en oeuvre.

3. Comportement thermique et mécanique des pieux échangeurs

3.1. Réalisations existantes

Il existe en Autriche des dizaines de bâtiments basés sur ce principe. A Francfort en Allemagne, une tour de 199 m utilise des pieux échangeurs pour effectuer du "free cooling" [HUD 98]. En Suisse, des systèmes avec pieux échangeurs allant d'une puissance thermique de 90 à 840 kW ont déjà été réalisés [FRO 97] et leurs performances thermiques mesurées ; d'autres sont à l'étude, comme celui qui est prévu pour le nouveau terminal de l'aéroport de Zürich - Kloten [PAH 99] (bâtiment de 500 m de long sur 40 m de large). La majorité des remarques et commentaires de cet article sont essentiellement basés sur ces réalisations helvétiques.

Malgré le nombre déjà conséquent de bâtiments utilisant ce principe, il est apparu, après analyse du comportement thermique de plusieurs de ces systèmes, que leur dimensionnement et leur gestion n'étaient pas toujours optimaux ; en d'autres termes, ces réalisations souffraient de quelques "maladies de jeunesse". C'est ce constat qui a poussé l'Office Fédéral de l'Energie Suisse (OFEN) à financer une étude sur le dimensionnement de telles installations [FRO 97].

En ce qui concerne les problèmes liés à la statique, il apparaît, à notre connaissance, qu'aucune étude sur l'intégrité des pieux soumis à des sollicitations thermiques n'aït été publiée à ce jour. Donc une méconnaissance totale existe sur l'effet des variations thermiques sur la mobilisation du frottement latéral, la charge en pointe et l'évolution de la rigidité des pieux et l'effet des contraintes d'origine thermique sur le comportement de la structure portée.

La suite de ce chapitre se composera tout d'abord d'une présentation d'un modèle permettant de mettre en place des règles de dimensionnement. Elle sera suivie d'une réflexion sur la question liée à la statique et aux modifications du comportement mécanique de l'interface sol - pieu soumise à des fluctuations thermiques.

3.2. Comportement thermique et énergétique d'installations avec pieux échangeurs

Cette partie est basée sur l'étude "Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs" [FRO 97]. Afin d'étudier le comportement thermique et énergétique d'installations avec pieux échangeurs, un modèle de simulation numérique dynamique appliquée à l'ensemble du système bâtiment - pompe à chaleur - pieux échangeurs a été développé et validé par des mesures effectuées sur des installations existantes. Le modèle numérique est basé sur le

logiciel TRNSYS [KLE 96], sur lequel sont venus se greffer principalement deux modules (TRNSBM [PAH 96A] et TRNVDSTP [PAH 96B]), adaptés spécialement pour simuler le comportement thermique dynamique de pieux échangeurs. Les mesures utilisées pour la comparaison avec les modèles numériques ont essentiellement été effectuées sur l'installation de Finkernweg, mais également sur celles de Lidwil, de Pago AG, de Durrer (Alpnach) et de Photocolor ; toutes ces réalisations sont situées au nord-est de la Suisse, dans des zones alluviales (voir caractéristiques dans la section 3.2.2). Ensuite, une étude de sensibilité a été effectuée à l'aide du modèle validé. Cela nous a permis de relever les paramètres les plus importants et ainsi d'en déduire des règles élémentaires de dimensionnement pour une installation type avec pieux échangeurs.

3.2.1. *Description du modèle*

Le programme de simulation dynamique TRNSYS 14.2 [KLE 96] est utilisé pour le calcul des flux thermiques qui transitent par les différents composants d'une installation avec pieux échangeurs. Sa structure modulaire permet d'adapter les outils de simulation à la configuration des installations étudiées, par l'assemblage adéquat des modules de calcul correspondants. Ces derniers simulent de façon dynamique un composant du système, comme la pompe à chaleur ou l'ensemble des pieux échangeurs. D'autres modules simulent vannes, pompes, tuyaux ou régulation, ce qui permet de reproduire le couplage hydraulique des composants, la stratégie de contrôle du système et finalement de simuler chaque composant comme partie intégrante du système, par la prise en compte de leurs influences thermiques mutuelles. Le pas de temps utilisé dans les calculs doit être suffisamment petit pour reproduire l'évolution temporelle des processus thermiques simulés. Typiquement, la simulation dynamique d'une pompe à chaleur nécessite un pas de temps de quelques minutes, si les effets transitoires des enclenchements et des déclenchements sont pris en compte dans le modèle.

La simulation du système est possible une fois les connections entre les modules définies, les paramètres et valeurs initiales des modules spécifiés, et les évolutions temporelles des grandeurs qui conditionnent le fonctionnement du système connues (variables météorologiques, conditions d'exploitations, etc.). Les paramètres peuvent être directement déduits des informations relatives au système et à la spécification de chaque composant, ou calculés avec un programme adéquat ou encore déterminés selon une méthodologie bien établie (cf. figure 4). Les variables de sortie d'un module dépendent de ses variables d'entrée, générées par un ou plusieurs autres modules, qui, à leur tour, peuvent dépendre des variables de sortie du premier module. Un processus itératif est donc nécessaire pour que les variables calculées convergent vers une solution à chaque pas de temps. Parmi ses multiples fonctions, le programme TRNSYS gère le calcul de chaque module, organise les entrées et sorties, et permet de solutionner des équations différentielles selon les besoins des modules de calcul.

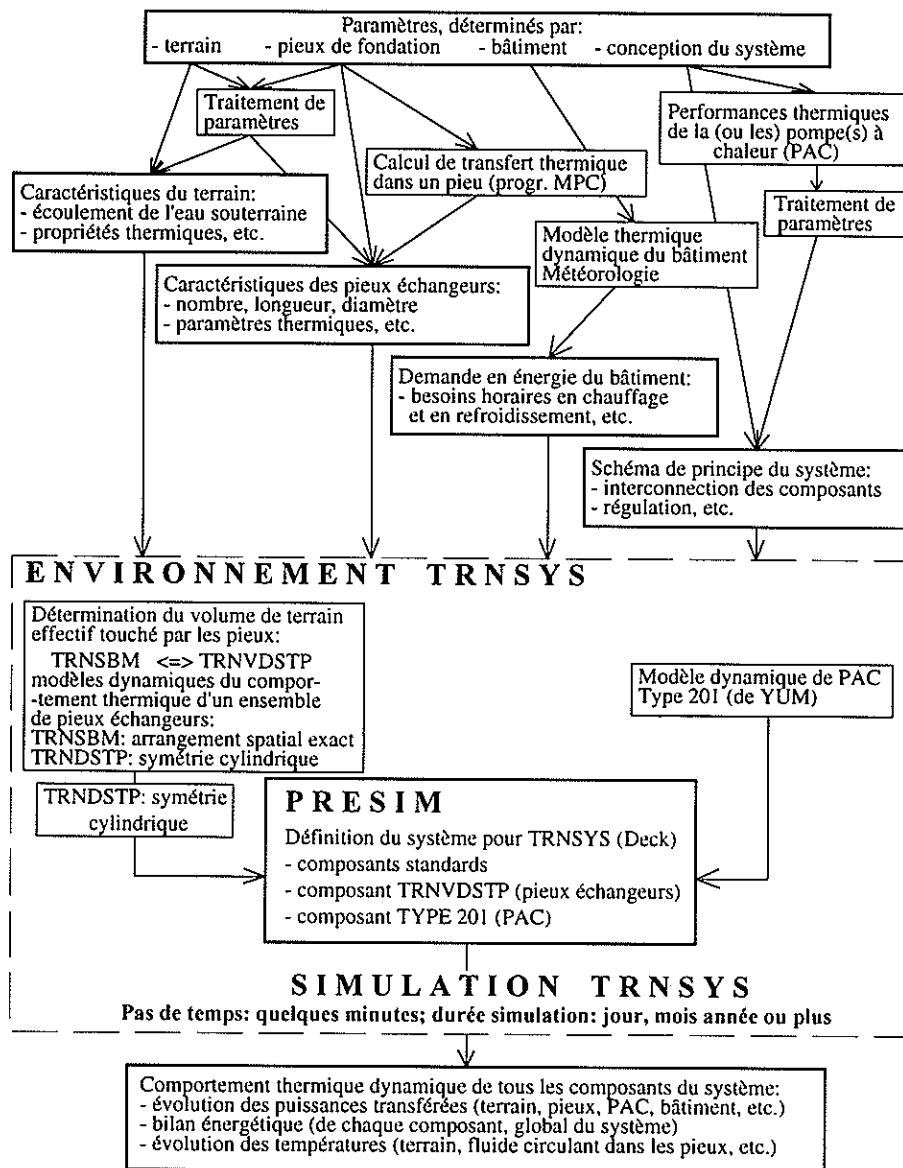


Figure 4. Méthodologie suivie pour la simulation d'un système avec pieux échangeurs [FRO 97]. Methodology used for the simulation of a heat exchanger pile system [FRO 97].

Différents modules non standards de la librairie TRNSYS ont été utilisés pour la simulation d'une installation avec pieux échangeurs ; il s'agit d'un modèle de PAC (TYPE201), d'un modèle de stockage diffusif par sondes verticales qui a été adapté à la problématique des pieux échangeurs (TRNVDSTP), et d'un modèle de sondes géothermiques multiples (TRNSBM). Les deux derniers modèles ont été mentionnés plus haut.

Le modèle de pompe à chaleur (PAC) utilisé dans YUM (Yearly Utilization Model) [AFJ 89], a été récemment intégré dans TRNSYS [AFJ 96]. Ce module de calcul non standard (TYPE201), simule une PAC électrique air - eau, eau - eau ou saumure - eau. La pompe à chaleur est traitée comme une boîte noire selon les spécifications du fabricant ; les puissances thermiques délivrées et électriques consommées dépendent des températures du fluide caloporteur à l'entrée de l'évaporateur et à la sortie du condenseur, conformément aux caractéristiques données par le fabricant. Lors d'un enclenchement de la PAC, la puissance thermique délivrée n'atteint pas immédiatement sa valeur nominale, qui est obtenue en régime permanent. Cet effet transitoire est pris en compte par une constante de temps qui caractérise cet effet de retard. Une autre constante de temps est utilisée pour les déclenchements. Sur la base des températures d'entrée au condenseur et à l'évaporateur, des débits et du signal de marche ou d'arrêt de la PAC, les puissances thermiques transférées au condenseur et à l'évaporateur, la puissance électrique consommée ainsi que le coefficient de performance (COP) sont calculés.

Deux modèles non standards sont utilisés pour simuler le système de pieux échangeurs. Il s'agit de TRNVDSTP, version adaptée de TRNVDST, et de TRNSBM [PAH 96A et PAH 96B]. Une description plus détaillée des modèles et des méthodes de résolution se trouvent dans l'annexe 1. Contrairement à TRNVDSTP, un mouvement régional de l'eau souterraine et le transfert de chaleur causé par les tubes de connexion en surface ne peuvent pas être pris en compte dans TRNSBM. En revanche, TRNSBM peut simuler la disposition exacte des pieux, ce qui permet d'évaluer l'influence de l'arrangement spatial des pieux par comparaison avec les résultats obtenus avec TRNVDSTP, et d'évaluer un espacement effectif moyen des pieux en calant TRNVDSTP sur TRNSBM.

Le transfert de chaleur dans les pieux est caractérisé par une résistance thermique (R_b) entre le fluide et le terrain sur le pourtour du pieu. Ce paramètre doit être spécifié dans TRNVDSTP ou TRNSBM, et donc être a priori connu. Il est calculé par l'outil de calcul MPC [BEN 87], qui utilise une solution analytique exacte du transfert de chaleur par conduction à l'intérieur d'un pieu. Les effets capacitifs des pieux peuvent également être pris en compte.

Le transfert de chaleur échangé par les tubes qui connectent les pieux en surface est traité par la méthode développée par Koschenz et Dorrer [KOS 96], qui permet de ramener le problème bi-dimensionnel du transfert thermique entre les tubes et le terrain à un problème à une dimension. Une résistance thermique entre le fluide et le terrain permet de tenir compte de l'arrangement des tubes en surface. Ces derniers

sont supposés uniformément placés dans l'interface pieux - bâtiment, ce qui fournit une valeur maximale pour le calcul du transfert thermique des tubes en surface.

3.2.2. Validation du modèle thermique

D'une manière générale, un modèle numérique est validé pour des valeurs de paramètres qui restent à l'intérieur d'intervalles donnés. En toute rigueur, l'usage du modèle avec un paramètre qui sort du domaine de validation devrait faire, au préalable, l'objet d'une nouvelle validation. A défaut, la fiabilité des résultats repose sur le "contenu physique" du modèle et la précision des méthodes de résolution utilisées.

Le modèle a été calibré et validé par comparaison avec des mesures effectuées sur quatre installations, toutes situées en Suisse. Il s'agit de Finkernweg (90 kW, 7.000 m³ chauffé, 75 pieux échangeurs de 11 m de longueur active¹), de Lidwil (160 kW, 30.000 m³ chauffé, 120 pieux échangeurs de 17 m de longueur active), de Pago (840 kW, 130.000 m³ chauffé, 570 pieux échangeurs de 14 m de longueur active) et de Photocolor à Kreuzlingen (130 kW, 8.000 m³ chauffé, 93 pieux échangeurs de 10 m de longueur active). Certaines installations étaient monovalentes, d'autres bivalentes ; certaines étaient également utilisées pour la production de froid en été par "free cooling", d'autres pas. Le suivi des installations et les mesures effectuées ont été menés sur des périodes de deux à trois ans [FEL 97, KAP 97, SCH 93 et SCE 97].

L'installation Finkernweg a été utilisée pour confronter les mesures aux simulations, en raison du petit pas de temps utilisé (10 minutes) pour les mesures effectuées entre février et mai 1995. Les modèles de pompe à chaleur et de pieux échangeurs ont pu être testés séparément sur cette période. En ce qui concerne les pieux échangeurs, un ensemble de paramètres qui permet de correctement simuler l'évolution mesurée de la puissance thermique transférée par les pieux n'est pas unique. A titre d'illustration, les mesures ne permettent pas de déterminer de manière indépendante la résistance thermique des pieux et la conductivité thermique moyenne du terrain. Une méthodologie a été élaborée pour l'estimation de ces paramètres, basée sur les connaissances géologiques du terrain et les caractéristiques de l'installation, qui conduit à l'établissement d'un ensemble de paramètres adéquats. Pour l'installation Finkernweg, les principaux paramètres sont, dans l'ordre décroissant de leur influence² sur l'extraction d'énergie thermique pendant cette période de chauffage :

- la longueur totale des pieux échangeurs ;
- l'espacement moyen entre les pieux ;
- la conductibilité thermique moyenne du terrain ;
- la capacité thermique volumique moyenne du terrain ;
- le coefficient de transfert de chaleur global entre le terrain et les locaux du bâtiment ;

¹ La longueur active d'un pieu échangeur est la longueur de pieu équipée avec des tuyaux pour l'échange de chaleur avec le terrain.

² L'influence d'un paramètre sur l'énergie thermique extraite est estimée par le quotient entre la variation relative de l'énergie simulée par la variation relative du paramètre considéré.

- la résistance thermique d'un pieu ;
- etc.

L'écoulement de l'eau souterraine n'a pas d'influence significative ici, bien qu'il puisse être un paramètre prépondérant. Il aura surtout un effet à long terme, par une régénération thermique du terrain dans la zone traversée par les pieux.

Comme le montre la figure 5, le comportement à long terme est bien simulé par l'ensemble de paramètres déterminés selon la méthodologie établie. La température moyenne du fluide caloporteur est montrée en valeurs journalières pour deux simulations distinctes : l'écoulement de l'eau souterraine est simulé avec une vitesse de Darcy de 0,1 et de 1,0 m/jour. Pour pouvoir reproduire la baisse observée de la température du fluide caloporteur dans les pieux hiver après hiver, la vitesse de l'écoulement de l'eau souterraine doit être relativement faible, de l'ordre de 0,1 m/jour, ce qui est conforme aux estimations.

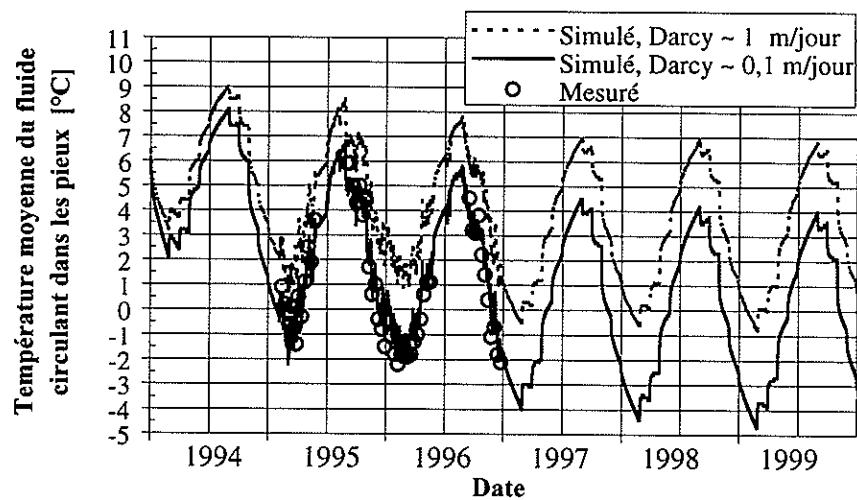


Figure 5. Evolution de la température moyenne journalière du fluide caloporteur circulant dans les pieux de l'installation Finkernweg. La courbe simulée avec l'écoulement de l'eau souterraine le plus faible (vitesse de Darcy de 0,1 m/jour) permet de mieux reproduire les mesures. Evolution of the daily mean temperature of the heat carrier fluid in the piles (Finkernweg installation). The simulated curve with the smallest ground water flow (Darcy velocity of 0,1 m/day) permits a better reproduction of the measurement points.

Compte tenu de la puissance thermique d'extraction (≈ 70 W/m) et de la résistance thermique des pieux échangeurs (0,06 K/(W/m)), le terrain sur le pourtour du pieu peut geler si la température du fluide caloporteur descend sous la barre des -4 °C, soit théoriquement après 4 à 5 ans de marche du système. D'une manière générale, le fluide caloporteur dans les pieux ne devrait jamais descendre sous 0 °C, ce qui montre que les pieux sont sous-dimensionnés du point de vue thermique, même si l'écoulement de l'eau souterraine était important.

La méthodologie pour la détermination des paramètres relatifs à la simulation des pieux échangeurs a été utilisée avec succès sur les trois autres installations. La dynamique sur de courtes périodes de temps est également bien reproduite avec l'outil de simulation. La figure 6, relative à l'installation Pago, permet de comparer l'évolution des températures mesurées et simulées dans les pieux échangeurs au cours d'une journée, avec un pas de temps de 15 minutes, pour un mode d'utilisation avec alternance d'extraction et d'injection de chaleur. (Durant cette journée, 2.200 kWh sont extraits avec une puissance maximum de 40 W/m et 1.500 kWh sont injectés avec une puissance maximum de 30 W/m de pieu). L'espacement moyen entre les pieux a du être diminué de 3,7 à 2,2 m pour ajuster les calculs sur les mesures, puisque dans ce cas précis, l'arrangement des pieux est particulièrement hétérogène. La majorité des pieux sont groupés par constellations de 3 à 8 avec un espacement moyen de 1,4 m. Il en résulte 75 constellations espacées de plus de 8 m, ce qui a pour effet de créer des " zones mortes " entre les pieux qui ne contribuent pas aux transferts thermiques pendant la période mesurée (1 an). Il en résulte un volume de terrain ou un réservoir de chaleur beaucoup plus petit, qui a un effet négatif sur les performances thermiques du système. Un arrangement uniforme des pieux est donc bénéfique du point de vue thermique.

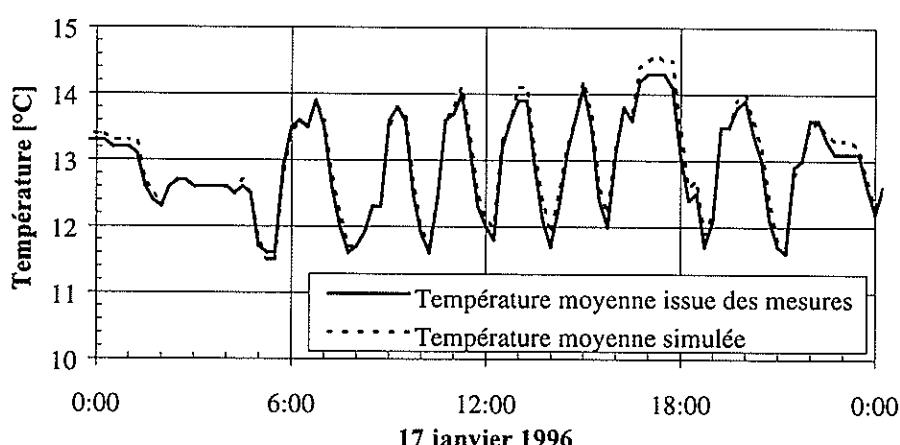


Figure 6. Evolution des températures moyennes mesurées et simulées du fluide caloporteur circulant dans les pieux de l'installation Pago. Evolution of the measured and simulated mean temperature of the heat carrier fluid which flows in the piles of the Pago installation.

Le modèle a été validé pour des valeurs de paramètre qui correspondent à 4 installations mesurées. La validation du modèle est donc liée au domaine de variation de chacun des paramètres utilisé. Fort heureusement, la plupart des paramètres couvrent les conditions généralement rencontrées lorsqu'un système avec pieux échangeurs est envisagé. Le modèle permet de reproduire de façon satisfaisante aussi bien les effets à court terme qu'à long terme. Ce modèle numérique peut maintenant servir à des prédictions de performance thermique, des études paramétriques ou encore à des analyses de sensibilité.

3.2.3. *Aperçu de l'analyse de sensibilité*

L'étude de sensibilité aux paramètres des performances thermiques du système permet d'évaluer leur importance relative. L'importance des paramètres les plus incertains ou les plus mal connus peut être ainsi quantifiée et relativisée. Dans cette section, les résultats obtenus, pour un cas de référence bien précis (installation Finkernweg), sont donnés à titre d'illustration. La sensibilité aux paramètres de l'énergie thermique extraite du terrain pendant la période de chauffage a été évaluée. Elle exprime la variation en pour-cent de l'énergie calculée relativement à une variation arbitraire du paramètre considéré. Les paramètres sélectionnés sont la conductivité thermique du terrain, la résistance thermique des pieux, la vitesse d'un mouvement d'eau souterrain, la longueur effective des connexions horizontales et la capacité thermique effective du béton formant les pieux échangeurs.

A titre d'exemple, on présente dans la figure 7 la sensibilité de la quantité de chaleur extraite par les pieux à la vitesse d'un écoulement souterrain. Les conditions d'exploitation des pieux sont données en entrée au programme de simulation par les évolutions temporelles mesurées de la température du fluide caloporteur et de son débit. L'évolution de la puissance thermique transférée est alors calculée et intégrée par le programme. L'énergie résultante correspond à la période qui s'étend de février à mai 1995. La sensibilité est établie en répétant les calculs pour diverses valeurs du paramètre considéré, qui est, dans le cas présent, la vitesse de Darcy (grandeur représentative d'un écoulement souterrain).

Dans le cas de référence, la vitesse de Darcy a été fixée à 10^{-5} m/s, soit environ 0,9 m/jour, pour une couche unique de 2,5 m d'épaisseur susceptible de conduire un écoulement d'eau. On a fait varier la vitesse de Darcy de 0 m/jour jusqu'à la valeur irréaliste de 90 m/jour (ou 10^{-3} m/s). Les calculs n'ont pas pris en compte l'effet sur le problème local (voir annexe 1), ou l'influence sur le champ de température autour de chaque pieu. Les résultats exposés sont basés sur une méthode proposée pour le calcul de l'influence de l'eau souterraine sur le problème global (voir annexe 1).

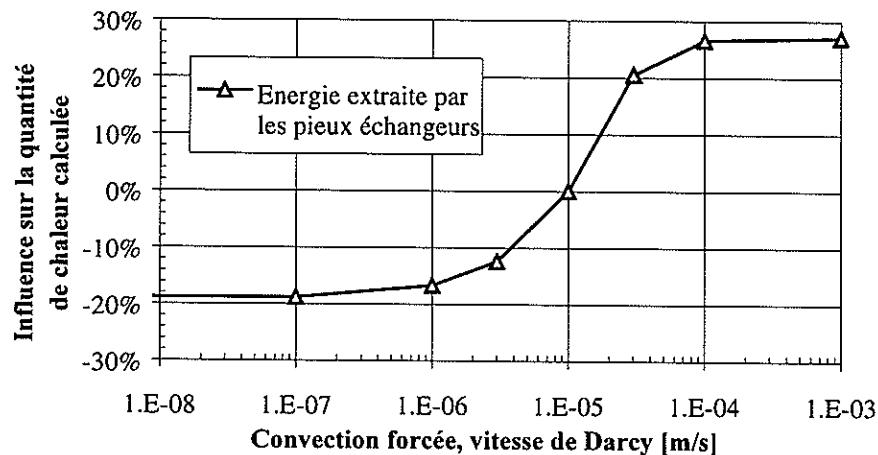


Figure 7. Influence de la vitesse de Darcy sur la quantité d'énergie extraite des pieux.
Influence of the Darcy velocity on the extracted energy from the piles.

Dans ce cas, l'effet d'un écoulement d'eau souterrain devient significatif pour une vitesse de Darcy supérieure à 10 cm/jour. En fait, la présence d'un écoulement souterrain peut être assimilée à une conductibilité thermique du terrain effective accrue. En ce sens, un écoulement souterrain important est bénéfique sur la quantité d'énergie soutirable ; en d'autres termes, l'énergie du terrain est plus rapidement régénérée par le terrain avoisinant. En contrepartie, dans ce cas de figure, le stockage saisonnier de l'énergie thermique ne devient plus possible, et il est alors inutile de vouloir "stocker du froid" en hiver pour satisfaire des besoins de refroidissement en été.

Il est apparu que la vitesse de Darcy joue effectivement un rôle important pour le dimensionnement et la gestion de tels systèmes (voir section suivante "recommandations").

3.2.4. Principales recommandations sur les aspects thermiques

En raison de son caractère multidisciplinaire, la conception d'une installation avec pieux échangeurs doit intervenir très tôt dans un projet. Un dimensionnement correct demande de définir avec le plus grand soin le contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique local. D'autre part, les besoins en énergie, aussi bien en chaleur qu'en refroidissement, doivent être connus à l'avance et le plus précisément possible ; (idéalement, on devrait connaître l'évolution temporelle des puissances demandées et de leurs niveaux de température associés pendant une année type). A partir de là, différentes variantes de systèmes peuvent être évaluées, dimensionnées et comparées, sur la base du nombre de pieux de fondation à disposition, de leur emplacement et de leurs caractéristiques physiques et thermiques.

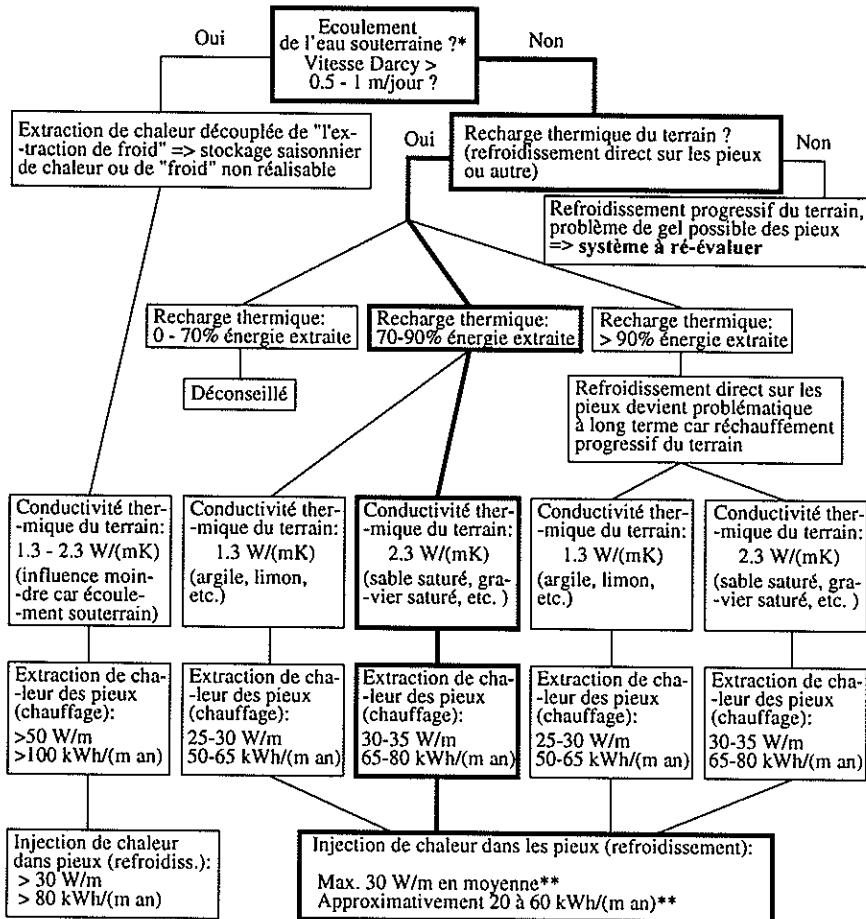
Cette démarche peut être effectuée plusieurs fois dans un projet, en fonction de l'état de connaissance des données et de leur évolution entre la phase initiale et la phase finale du projet, de manière à affiner chaque fois le concept et le dimensionnement du système. Si le concept final doit être établi avec l'aide d'un outil de simulation dynamique, ce n'est pas forcément le cas pour un avant-projet, lorsque des choix technologiques sont effectués. Dans le but de pouvoir dimensionner un avant-projet sans recourir à un outil de simulation dynamique, une série de recommandations ont été établies sur la base de simulations numériques appliquées à un système de pieux échangeurs typique. Elles ont été obtenues par les outils de simulation présentés précédemment qui ont été développés et validés sur les quatre installations mesurées.

Le diagramme de la figure 8 synthétise les principaux résultats relatifs au dimensionnement d'un système avec pieux échangeurs. Il est valable pour un système dit de "référence" dont les principales caractéristiques sont :

- système mono-vaient (pas d'énergie auxiliaire comme appoint) ;
- pas de demande d'eau chaude sanitaire à satisfaire ;
- pieux de relativement petits diamètres (35 cm), espacés d'environ 4 mètres.

Un sur-dimensionnement thermique de la longueur des pieux échangeurs permet d'augmenter la température du fluide caloporteur dans les pieux. Toutefois, l'amélioration du coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur ne permet pas de justifier l'augmentation de l'investissement relatif aux pieux échangeurs. Inversement, un sous-dimensionnement thermique conduit à des températures plus basses dans les pieux, ce qui peut entraîner un risque de gel. Dans la figure 8, les valeurs indiquées correspondent à un dimensionnement "correct", dans le sens où la température du fluide dans les pieux peut descendre parfois à 0 °C, mais sans courir le risque de geler les pieux. Ces résultats sont à considérer avec prudence pour toute extrapolation à un autre type de système, mais servent déjà les besoins de pré-dimensionnement pour un avant-projet.

L'importance d'un écoulement régional de l'eau souterraine est une question primordiale pour savoir si une régénération thermique du terrain est nécessaire. Dans la figure 8, le chemin indiqué en gras correspond à un faible écoulement, et une recharge thermique de l'ordre de 70 - 90 % de l'énergie annuellement extraite est nécessaire pour éviter un abaissement inadmissible des températures du terrain à long terme. Si la recharge thermique n'excède pas 90 %, elle peut être effectuée par refroidissement direct sur les pieux (i. e. : sans le recours d'une machine de froid). Dans un terrain bien conducteur (relativement aux terrains qui nécessitent la mise en oeuvre de pieux de fondation), le système doit être dimensionné pour une extraction de chaleur qui correspond à 30 - 35 W par mètre linéaire de pieu échangeur, et à une extraction annuelle de 65 - 80 kWh par mètre de pieu échangeur.



* il suffit que l'eau souterraine s'écoule dans une couche traversée par les pieux échangeurs, même mince relativement à la profondeur de ces derniers, pour que l'effet soit significatif.

** si la recharge thermique du terrain excède 90% de l'énergie prélevée, la température du terrain aura tendance à augmenter à long terme, ce qui limitera la recharge thermique si elle est réalisée par du refroidissement direct sur les pieux.

- avec pieux de diamètre plus grand (> 40 cm), l'espacement est généralement plus grand, et les performances indiquées ci-dessus peuvent être revues à la hausse (jusqu'à 50% pour des pieux de 1 m de diamètre).

- les valeurs données ci-dessus se réfèrent à un système mono-valet. Pour un fonctionnement en ruban des pieux, la puissance par mètre de pieu sera plus basse et la quantité d'énergie par mètre de pieu plus grande.

Figure 8. Synthèse des principaux “chemins” possibles relatifs à un pré-dimensionnement d'un avant-projet similaire au système de référence défini dans la section 3.2.4. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu échangeur.
Synthesis of the main possible “paths” relative to a pre-design of a pre-project similar to the reference system defined in section 3.2.4. The given heat rates and energies are expressed per linear meter of heat exchanger pile.

3.3. Comportement statique des pieux échangeurs

D'un point de vue géotechnique, le concept pieux échangeurs introduit un nouveau paramètre : les variations thermiques dont l'intensité conditionne le comportement des fondations. Dans cette section, une réflexion sur l'impact de telles variations thermiques sur la statique du bâtiment est présentée. Il est à noter que le concept de pieux échangeurs se base sur un système où une température supérieure à 2°C est imposée dans le pieu. Dès lors, les problèmes de gel n'ont pas lieu d'être induits par ce genre de système. Nous rappelons que cette étude ne concerne que des installations dans des couches géologiques saturées.

En tout premier lieu, il est à noter qu'il n'existe pas à notre connaissance de travaux spécifiquement consacrés aux aspects géotechniques du concept pieux échangeurs. Cette constatation a déjà été relevée dans la littérature [HAD 93]. En outre, des travaux liés aux effets de la température sur le comportement d'un pieu ou de groupes de pieux sont eux aussi pratiquement inexistant.

Dans le concept des pieux échangeurs, les températures mises en œuvre varient globalement entre 2°C (à la fin de l'hiver) et 30°C (à la fin de l'été). Les effets de cette variation de température revêtent divers aspects dont :

- création de contraintes supplémentaires de compression dans le pieu. L'intensité de ces contraintes dépend de la variation thermique et du degré de rigidité de la structure. Ainsi, les contraintes d'origine thermique sont proportionnelles aux valeurs des déformations d'origine thermique empêchées par la structure (il s'agit des déformations qui se seraient produites s'il n'y avait pas de structure). L'intensité des contraintes thermiques dans le pieu peut alors atteindre des valeurs importantes pour les structures à coefficient de rigidité élevé (structures qui empêchent toute déformation). Il est donc important de tenir compte de ces contraintes supplémentaires dans le dimensionnement des pieux. Une première approximation des contraintes d'origine thermique peut-être obtenue sur la base d'une hypothèse de dilatation thermique monodimensionnelle du pieu en négligeant les frottements latéraux et tenant compte de la rigidité de la structure. Une comparaison entre un calcul basé sur cette hypothèse [PAS 98], et des mesures in-situ [MOR 98] a montré l'intérêt de cette hypothèse de pré-dimensionnement [LAL 99].

Vu que le pieu est sollicité en compression par la charge du bâtiment, les sollicitations thermiques de type cyclique (un cycle de charge - décharge par an) ne devraient pas avoir d'effets sensibles sur le béton du pieu, pour les gammes de température qui nous concernent.

- l'asymétrie des champs thermiques dans le pieu pourrait conduire à un moment de flexion dans le pieu. Ce phénomène peut être évité par une disposition adéquate des tubes caloporeurs dans les pieux.
- effets sur l'interface sol - pieu. Ce niveau de variation de la température (de 2°C à 30°C) peut être considéré du point de vue géotechnique comme proche de celui des niveaux de variation thermique de certains écarts saisonniers naturels. Dans ces conditions, il est d'usage en géotechnique de négliger les effets thermiques. Pour le concept pieux échangeurs, cela signifierait qu'il n'y a pas lieu de prévoir

des études spécifiques pour quantifier l'impact de la température sur l'interface sol - pieu. Afin de valider cette hypothèse, dont on peut facilement imaginer les conséquences, un test en vrai grandeur est en cours de réalisation par les auteurs [LAL 98] et fera l'objet d'une prochaine publication.

Cependant, bien que les pieux échangeurs soient conçus pour des températures de type "normales" (de 2°C à 30°C), il est important d'envisager la possibilité d'injection dans les pieux de températures plus élevées. Celles-ci pourraient être envisagées dans deux cas : 1) celui d'un accident de fonctionnement qui ferait que le système continue à injecter de la chaleur dans les pieux au-delà des périodes saisonnières prévues ; 2) dans le cas où il y aurait une recharge thermique extérieure (par panneaux solaires par exemple). Dans ces conditions, la température peut atteindre les 50-60°C et une attention particulière devrait être accordée à l'effet de la température sur le comportement des fondations. Parmi les effets à prendre en considération, il est à retenir :

- la modification des caractéristiques mécaniques au contact pieu - sol. Celle-ci pourrait se traduire par une variation des paramètres de résistance au cisaillement du sol [LAL 92, LAL 97 et MOD 97] ce qui aurait des conséquences sur la mobilisation du frottement latéral et donc sur la portance du pieu.
- les dilatations thermiques des pieux. Elles sont de deux types : longitudinales et radiales. Pour les dilatations longitudinales, leur effet devient particulièrement important quand une partie des pieux n'est pas équipée d'échangeurs de chaleur ce qui crée, selon la rigidité de la structure, soit des déformations différentielles, soit des contraintes de flexion dans la structure, deux phénomènes dont il faut tenir compte dans le dimensionnement.
Quand la répartition spatiale des échangeurs thermiques est homogène, il se crée un soulèvement global de la structure. L'essai de validation in-situ en cours de réalisation [LAL 98] montre cependant que cet effet de soulèvement est de second ordre comparé au tassement dû au poids propre des structures.
En phase de refroidissement, après un important échauffement, existe le risque de diminution dans le plan radial de la section du pieu liée à la non restitution des contraintes thermiques. Cela peut provoquer un décollement à l'interface sol - pieu qui limiterait alors toute portance par frottement et transmettrait les charges en pointe.
- un autre aspect est à analyser lors d'une élévation significative de la température. Il concerne les surpressions d'eau dues aux dilatations thermiques de l'eau dans le champs proche atteint par la chaleur. Le fait que la perméabilité augmente avec l'augmentation de la température devrait faciliter la diminution de cette surpression d'eau [LAL 92].

De façon générale, les effets thermiques sont surtout sensibles lors du premier cycle de chargement [LAL 92], et nécessiteraient ainsi une attention particulière dans l'observation du comportement statique de la structure lors de la première année de mise en service des pieux échangeurs.

4. Exemple d'étude de faisabilité technique de pieux échangeurs

4.1. *Introduction*

Afin d'illustrer ce qui a été présenté dans les trois sections précédentes nous donnons ici à titre d'exemple quelques éléments d'une étude de faisabilité technique de pieux échangeurs.

Le projet est présenté dans le paragraphe 4.2. Les paragraphes 4.3 et 4.4 présentent respectivement la synthèse des données géotechniques et les principales caractéristiques des pieux échangeurs. Les performances énergétiques du système et le profil de température le long du pieu sont traités aux paragraphes 4.5 et 4.6. Le paragraphe 4.7 présente la vérification du dimensionnement d'un pieu. Les conclusions de cette étude sont présentées au paragraphe 4.8.

4.2. *Présentation du projet*

Les bâtiments des instituts d'architecture (AI) à construire au quartier nord de l'EPFL à Lausanne (Suisse) seront fondés sur pieux (figure 9). De plus, le système de chauffage prévu est à basse température ; il paraissait dès lors justifié d'envisager une solution basée sur la technologie des pieux échangeurs. Pour ce faire une étude de faisabilité technique basée sur les performances énergétiques du bâtiment a été faite.

4.3. *Synthèse des données géotechniques*

Les sols rencontrés sur le site de l'EPFL à Lausanne ont été classés en quatre couches principales [DEC 97] : sols alluvionnaires (couche A), moraine (couche B), moraine de fond (couche C) et molasse gréseuse ou marneuse (couche D) ; (voir figure 10).

La valeur limite du frottement latéral a été estimée à partir de deux essais de charge statique sur pieux exécutés en 1975 dans des conditions géotechniques similaires. Les essais ont montré que le frottement latéral maximum (q_s) était voisin de la cohésion non drainée c_{us} mesurée au scissomètre.

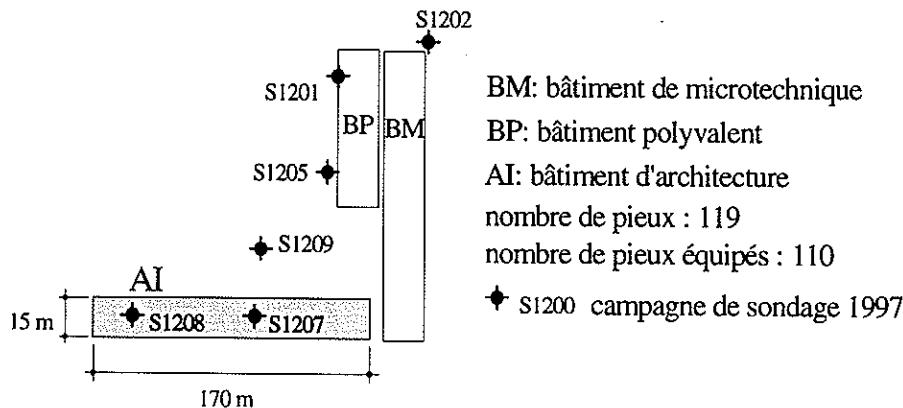


Figure 9. Nouveaux bâtiments du Quartier Nord de l'EPFL. New buildings in the north quarter of the EPFL.

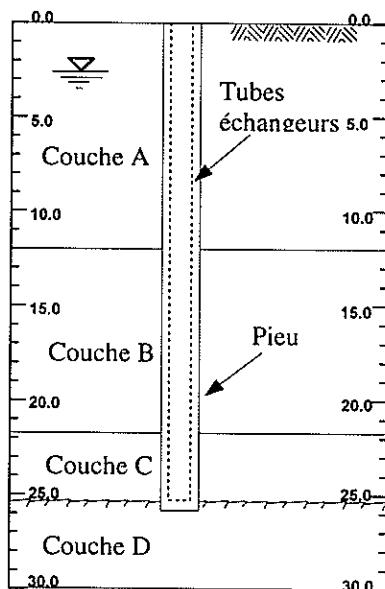


Figure 10. Coupe géotechnique avec emplacement du pieu. Geotechnical section with the location of the pile.

Sur la base des rapports géotechniques, les paramètres de dimensionnement du tableau 1 sont admis pour les couches B, C et D (q_p est la résistance en pointe dans la couche D) :

	Couche B	Couche C	Couche D
c_{us} [kPa]	30	135	-
q_s [kPa]	30	165	300
q_p [kPa]	-	-	16.000 (grès) 11.000 (marne)

Tableau 1. *Paramètres géotechniques de dimensionnement (couche B, C et D).* Geotechnical design parameters (layer B, C and D).

L'eau a été rencontrée systématiquement dans tous les 6 sondages effectués en 1997 (figure 9) [DEC 97] ; les mesures piézométriques indiquent un niveau de la nappe souterraine située entre 2 et 3 m de profondeur. L'eau souterraine s'écoule avec une vitesse moyenne annuelle insignifiante.

Du point de vue thermique, on distingue trois couches de terrain différentes (les couches B et C ont les mêmes propriétés thermiques) ; les propriétés thermiques des sols sont données au tableau 2.

Couche de terrain	Epaisseur moyenne m	Conductibilité thermique W/(mK)	Capacité thermique volumique MJ/(m ³ K)	Eau souterraine, vitesse de Darcy m/jour
Couche A	12,3	1,6	3,0	insignifiante
Couches B et C	6,9	2,3	2,6	insignifiante
Couche D	> 50	2,0	2,3	insignifiante
Température initiale de toutes les couches : 11 °C				

Tableau 12. *Paramètres relatifs au sol utilisés pour la simulation thermique du système.* Ground related parameters for the thermal simulation of the system.

4.4. Principales caractéristiques des pieux échangeurs

Un diamètre moyen de 1 m est admis pour les pieux du bâtiment considéré. La résistance thermique des pieux est admise à 0,06 K/(W/m), valeur typique pour ce type de pieu [FRO 97]. Sur les 119 pieux de fondation, il a été prévu que 110 seraient équipés en pieux échangeurs, ce qui correspond à un espacement de 5,6 m. Les pieux seraient équipés sur la totalité de leur longueur, à l'exception de la dernière partie du pieu fichée dans la molasse. La longueur active des pieux échangeurs varie entre 12 et 26 m, avec une valeur moyenne de 19,2 m.

4.5. Performances énergétiques du système

4.5.1. Demande de chaleur

La demande d'énergie de chauffage est basée sur un modèle simplifié à un noeud qui permet, à l'aide d'une année type pour l'évolution des températures de l'air extérieur sur le site de l'EPFL, de reproduire la demande d'énergie de chauffage annuelle spécifiée pour le bâtiment (738 MWh/an ou 250 MJ/(m²/an)).

La demande d'énergie de refroidissement est établie à 105 MWh/an, avec 35% pour le refroidissement de machines et 65% pour le refroidissement de locaux pendant l'été. La puissance de refroidissement maximale est estimée à 280 kW.

4.5.2. Dimensionnement et performances énergétiques du système

Compte tenu de la longueur des pieux à disposition, de la demande d'énergie annuelle de chauffage et de la méthodologie proposée à la figure 8, le système de chauffage ne pourra pas être monovent. Un appoint thermique sera nécessaire (système bivalent).

Les calculs, basés sur la méthodologie présentée dans la section 3.2 ont montré qu'une pompe à chaleur de 80 kW thermique permet d'utiliser les pieux échangeurs de façon optimale sans courir le risque de les geler. Dans la figure 11, l'énergie annuelle délivrée par la PAC (moyenne sur les dix premières années de fonctionnement du système) est montrée en fonction de sa puissance thermique au condenseur.

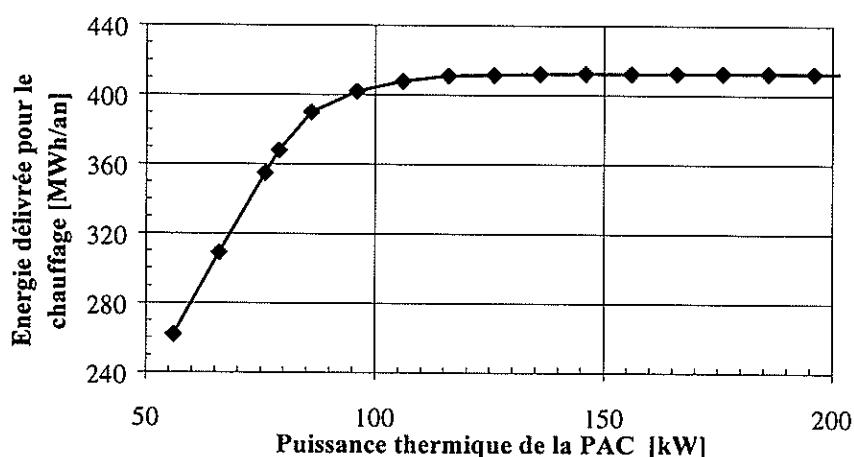


Figure 11. Energie annuelle (moyenne sur dix ans) délivrée par la PAC en fonction de sa puissance thermique. Annual energy (averaged over ten years) delivered by the heat pump in relation to its thermal power.

Lorsque la puissance thermique nominale de la pompe à chaleur est supérieure à 80 kW, la puissance doit parfois être limitée pour éviter une température d'entrée dans les pieux inférieure à 0 °C. Ceci explique le plateau observé dans la figure 11, qui montre que l'énergie thermique fournie par la pompe à chaleur sature vers un maximum de 420 MWh/an.

Le diagramme de Sankey de la figure 12 est établi sur la base d'une pompe à chaleur de 80 kW thermique (au condenseur) et des énergies annuelles simulées qui transitent par les pieux échangeurs.

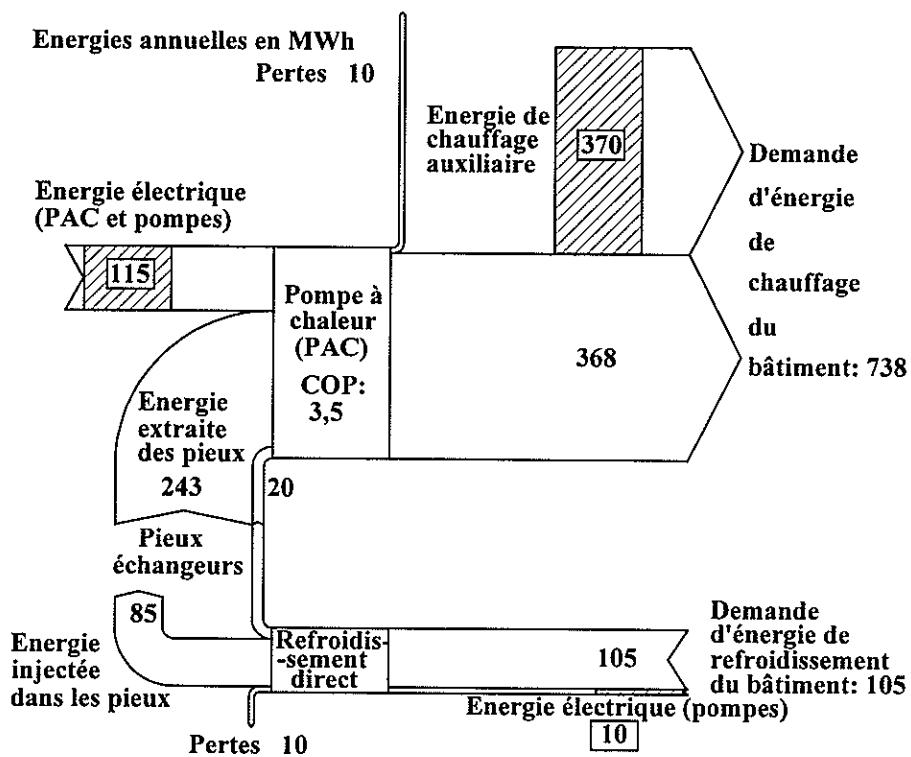


Figure 12. Diagramme des énergies annuelles qui transitent par les pieux échangeurs et la pompe à chaleur (diagramme de Sankey) du bâtiment étudié (quartier nord, EPFL). Diagram of annual energy fluxes through the heat exchanger piles and the heat pump (Sankey diagram) for the analysed building (north quarter, EPFL).

Les performances thermiques permettent d'établir les valeurs suivantes pour les puissances et les énergies transférées dans le terrain. Ces valeurs sont exprimées par mètre linéaire de pieu échangeur :

Chauffage :	25	W/m	115	kWh/(m an).
Refroidissement :	13	W/m (en continu)	40	kWh/(m an).

Relativement aux valeurs de dimensionnement données pour le chauffage dans la figure 8 (30-35 W/m et 65-80 kWh/(m an)), la puissance thermique est plus faible et l'énergie annuelle extraite plus grande. Cette différence s'explique par le fait que le système simulé dans cette section est bivalent avec des pieux de plus gros diamètres (1 m). Ce n'est pas le cas du système de référence qui a été défini pour l'établissement des règles de dimensionnement montrées dans la figure 8. La demande de refroidissement du bâtiment est faible en comparaison à la demande de chauffage, ce qui se traduit par une faible recharge thermique de terrain (35% de l'énergie annuelle extraite est réintroduite dans le terrain). Ceci explique également la faible puissance d'extraction obtenue. D'autre part, la forme particulièrement allongée du bâtiment favorise une régénération naturelle du terrain par des gains thermiques plus importants en provenance de l'environnement.

Cette étude de faisabilité montre qu'il faut rester très prudent lorsque des règles de dimensionnement sont utilisées. L'extrapolation à d'autres types de systèmes ne peut pas être effectuée sans précautions. Un outil de simulation sera toujours nécessaire pour lever un doute éventuel.

4.6. Profil de température le long d'un pieu

Dans le cas des pieux utilisés à l'EPFL, 70% de la charge du bâtiment est reportée sur la pointe du pieu. Afin de pouvoir évaluer l'influence thermique sur la portance de la pointe du pieu, un profil de température vertical dans l'axe d'un pieu est calculé pour une situation extrême.

La température maximale que l'on puisse avoir dans le fluide du circuit des pieux ne dépassera pas 30°C en fonctionnement normal. Le champ de température dans le terrain est calculé après 1 an de marche (situation extrême) avec une température d'entrée du fluide caloporteur de 30 °C. Le profil de température le long d'un pieu équipé sur 21 m en échangeurs thermiques en est déduit (cf. figure 13).

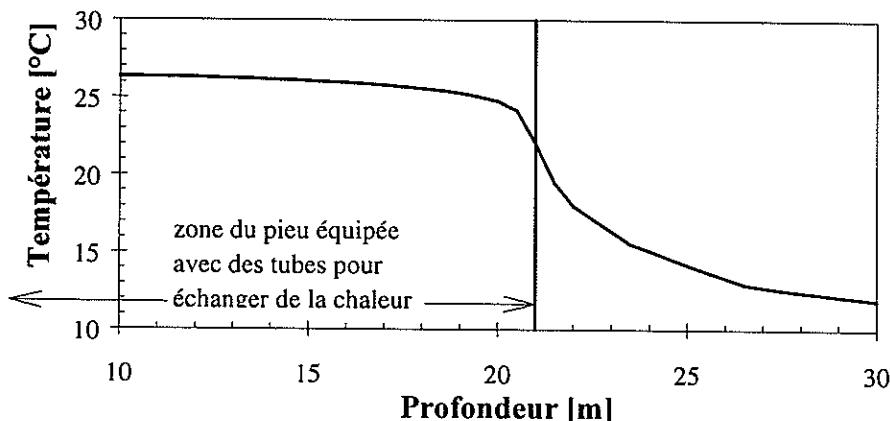


Figure 13. Profil calculé de température vertical le long d'un pieu échangeur après une période d'injection de chaleur arbitrairement longue (1 an) avec une température d'entrée du fluide caloporteur de 30 °C. Calculated vertical temperature profile along a heat exchanger pile after a heat injection period of 1 year with an inlet temperature of 30 °C for the heat carrier fluid.

4.7. Vérification du dimensionnement d'un pieu

Le pieu choisi pour la vérification du dimensionnement en présence des échangeurs thermiques a un diamètre de 88 cm et a une longueur de 25,6 m. La résistance au frottement latéral de la couche A est négligeable et la variation de température affecte le frottement latéral et pas la résistance en pointe.

Du fait que le seul paramètre géotechnique qui intervient lors du dimensionnement du pieu est la cohésion non drainée mesurée au scissomètre, la prise en compte des effets thermiques sur les paramètres de dimensionnement nécessite la caractérisation de l'influence de la température sur c_{us} .

A défaut de connaissances expérimentales de la dépendance de la température des cohésions non drainées des couches géologiques du site, nous avons été amenés à nous baser sur des essais disponibles dans la littérature.

Parmi les rares résultats existants à ce sujet, nous considérons les travaux de Fleureau [FLE 74] sur une argile noire. Des mesures effectuées avec un scissomètre et réalisées à différentes températures montrent une diminution presque linéaire du couple maximal avec l'augmentation de la température (figure 14). Cette diminution est de l'ordre de 40 % pour $\Delta T = 80 °C$.

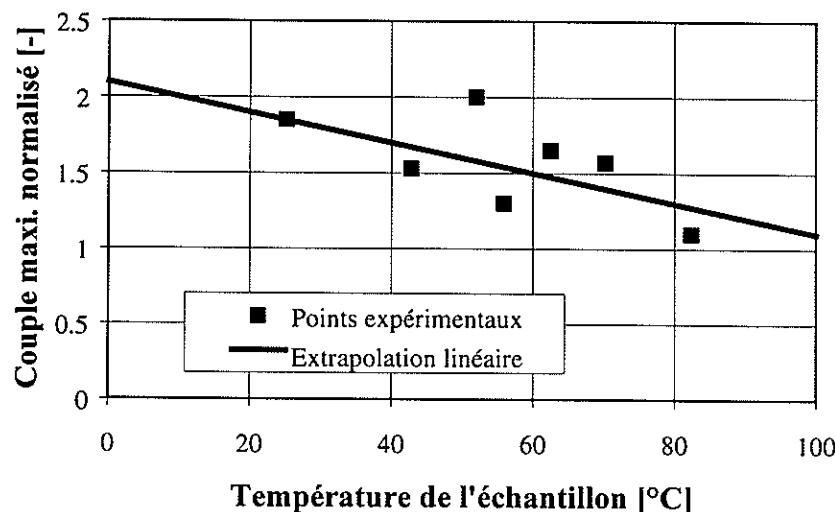


Figure 14. Relation entre le couple maximum du scissomètre et la température [FLE 74].
Correlation between the maximum torque of the scissometer and the temperature [FLE 74].

A partir de ce résultat, nous faisons l'hypothèse d'une diminution linéaire, de même pente que celle obtenue par Fleureau sur l'argile noire, de la cohésion non drainée de l'ensemble des couches du terrain. Ceci se traduit par une diminution de la résistance au frottement latéral du même ordre.

La méthode de calcul utilisée est celle proposée par la norme SIA V 192 [SIA 96] qui se résume par la formule suivante :

$$N_d < \frac{N_s}{\gamma_{mod} \cdot \gamma_{Ras} \cdot \xi} + \frac{N_p}{\gamma_{mod} \cdot \gamma_{Rab} \cdot \xi} = \frac{R_{da}}{\gamma_{mod}}$$

$$N_s = \sum_{i=1}^n t_i \cdot d \cdot q_{si} \quad N_p = \frac{d^2 \pi}{4} q_p$$

où les termes de l'équation sont :

γ_{mod} : facteur de modèle

R_{da} : valeur de dimensionnement de la résistance ultime externe.

γ_{Ras} : facteur de résistance relatif à la pointe

t_i : épaisseur de la couche i

γ_{Rab} : facteur de résistance relatif à la paroi

d : diamètre du pieu

ξ : facteur de réduction

q_{si} : résistance ultime au frottement latéral de la couche i

N_d : charge de dimensionnement

q_p : résistance ultime en pointe

N_p : résistance ultime en pointe

N_s : résistance ultime par frottement latéral

Le tableau 3 résume les principaux résultats obtenus.

Température [°C]	Frottement latéral pris en compte	SIA V 192	
		R_{da} / γ_{mod} [kN]	N_d [kN]
10	100 %	4811	2715
30	90 %	4652	2715
50	80 %	4492	2715

Tableau 3. Principales valeurs de dimensionnement en fonction de la température. Main design values in relation to the temperature.

La figure 15 montre la diminution de la résistance au frottement latéral en fonction de la température. Il est à noter, avec les précautions liées aux hypothèses, que la résistance du sol reste suffisante pour des température de l'ordre de 30 °C. Ceci est particulièrement vrai, dans le cas qui nous intéresse, du fait que 70% de la charge est reprise en pointe où l'effet thermique est supposé négligeable ($N_d = 2715$ kN et $R_{da} / \gamma_{mod} = 4811$ kN à 10 °C). La charge de service est de 2000 kN.

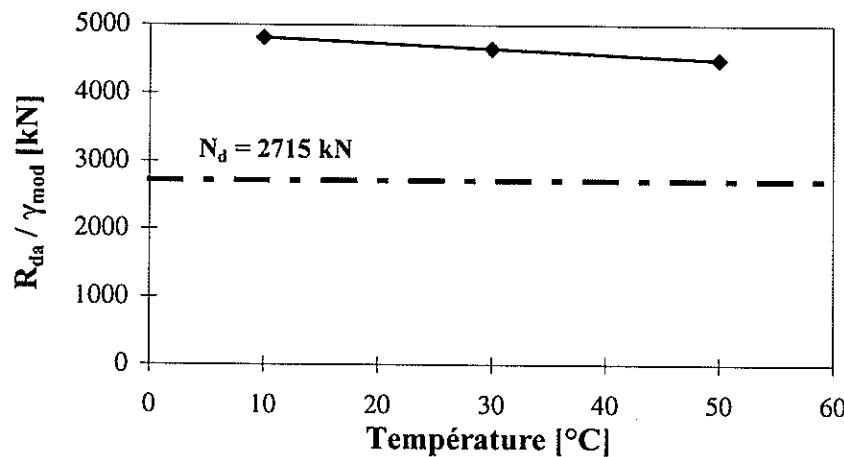


Figure 15. Evolution de R_{da} / γ_{mod} en fonction de la température. Dimensionnement selon SIA V 192. Evolution of R_{da} / γ_{mod} in relation to the temperature. Design according to SIA V 192.

Pour des températures de l'ordre de 30 °C (température maximale prévue dans le cadre des pieux échangeurs), la résistance du sol diminue d'environ 5 %. Dans ces conditions, il est évident qu'une telle variation de température n'affectera que faiblement la portance du sol.

Le bâtiment empêche l'allongement thermique du pieu. La rigidité du bâtiment peut être modélisée par un appui à ressort de rigidité $K=1 \text{ kNm}^2$ [PAS 98]. Si une charge thermique de $\Delta T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ est appliquée au pieu, le déplacement empêché est estimé à 1,35 mm et la force axiale de compression augmente dans le pieu d'environ 850 kN [PAS 98].

4.8. Conclusion sur l'application du concept pieux échangeurs à l'EPFL

Il a été montré que le concept de système de chauffage avec pieux échangeurs est applicable aux bâtiments des instituts d'architecture (EPFL, Lausanne). Une pompe à chaleur de 80 kW couplée sur les pieux permet de délivrer environ 370 MWh/an de chaleur dans le bâtiment, soit la moitié de la demande d'énergie de chauffage annuelle. Le reste (370 MWh/an) doit être couvert par une énergie d'appoint, avec une puissance thermique maximale d'environ 260 kW. La totalité de la demande d'énergie de refroidissement du bâtiment est couverte par le système des pieux échangeurs. Pour le comportement statique du système de fondation, il a été montré que les variations de température prévues (de 4 à 30°C) n'affectaient que faiblement la portance du sol (diminution de la portance de l'ordre de 5%). Il reste néanmoins important d'affiner les calculs en utilisant des données thermo-mécaniques propres à la géologie du site. Le fait que les pieux travaillent principalement en pointe dans la molasse contribue favorablement à la sécurité du système. En outre les contraintes de compression supplémentaires dues à l'effet thermique sont dans le cas étudié d'un ordre de grandeur du tiers de la charge de service (une charge d'origine thermique supplémentaire de 850 kN pour une charge de service $N_{ser} = 2.000 \text{ kN}$).

5. Conclusion générale

Les systèmes de chauffage/refroidissement intégrant des pieux échangeurs ont vraisemblablement un avenir prometteur ; non seulement, dans la mouvance d'un développement durable, l'utilisation de l'énergie renouvelable tirée de l'environnement va être de plus en plus préconisée, mais également, dû à la précarité de la ressource "sol", de plus en plus de bâtiments devront être réalisés sur pieux. La conjonction de ces deux effets, liés à la simplicité apparente de cette technologie devrait inciter bon nombre de concepteurs à adopter ce principe.

Cependant, cette facilité de mise en oeuvre ne doit pas masquer les problèmes de dimensionnement liés au comportement statique et thermique complexes de tels pieux. De par le nombre de paramètres intervenant dans ces calculs, il n'est guère aisé de tirer des règles générales, style "recettes de cuisines" ; chaque réalisation est un cas unique nécessitant son propre dimensionnement. Des outils validés existent,

les connaissances, bien qu'encore peu disséminées, sont également là ; reste la volonté des acteurs de s'investir dans une technique nouvelle, pouvant présenter quelques risques si certaines règles élémentaires ne sont pas appliquées, mais offrant également des débouchés intéressants et des perspectives nouvelles.

Remerciements

Le professeur L. Vulliet est l'instigateur du concept pieux échangeurs à l'EPFL. Son engagement dans ce projet a permis la réalisation de ce travail. Ce travail n'aurait pas pu être mené sans les contributions financières de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et de l'Office des Constructions Fédérales (OCF). Nous remercions également le bureau Passera & Pedretti pour sa collaboration.

Références

- [AFJ 89] AFJEI TH., YUM ; A Yearly Utilisation Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating Systems, Technical Form ; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IET - LES ; Zürich, Suisse, 1989.
- [AFJ 96] AFJEI TH. et al., Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe ; Phase 1 : Machbarkeitsanalyse, Problemanalyse und Vorbereitung zum Bau eines Funktionsmusters, Schlussbericht, Bundesamtes für Energiewirtschaft, ENET-Nummer 9655701, Suisse, 1996.
- [BEN 87] BENNET J., CLAESSEN J., HELLSTRÖM G., Multipole Method to Compute the Conductive Heat Flows to and between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987, Depts. Of Building Physics and Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987.
- [DEC 97] DE CÉRENVILLE GÉOTECHNIQUE, Extension Quartier Nord, Message 96. Rapport Géotechnique SM/AB-M7262B, 1997.
- [ESK 86] ESKILSON P., « Superposition Borehole Model ». Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1986.
- [ESK 87] ESKILSON P., Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987.
- [FEL 97] FELDER H. P., Energiefähle Lidwil Gewerbe AG, Altendorf. Schlussbericht, Programm Geothermie (Bundesamtes für Energiewirtschaft), SACAC Hergiswil AG, Hergiswil, Suisse, 1997.
- [FLE 74] FLEUREAU J.-M., Influence de la température sur les propriétés mécaniques de l'argile, Recueil de recherches effectuées sous la direction du Professeur Jean Biarez, Ecole Centrale de Paris, 1974.

- [FRO 97] FROMENTIN A., PAHUD D., JAQUIER C. ET MORATH M., Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiefahlsysteme, Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse, 1997.
- [FRO 98] FROMENTIN A., PAHUD D., LALOUI L., MORENI M., KAPP C. ET ROTH K., Pieux échangeurs - QN EPFL. Etude préliminaire de faisabilité technique et économique, rapport interne LMS SY40 / LASEN 120.105, EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.
- [HAD 93] HADORN J.-C., Problématique des pieux "échangeurs". SSMSR, publication n° 127, pp 17-18, 1993.
- [HEL 88] HELLSTRÖM G. AND NORDELL B., A Posteriori Study and Redesign of Large-Scale Borehole Heat Store in Luleå, Sweden. Proceedings of JIGASTOCK'88, Versailles, France, 1988.
- [HEL 89] HELLSTRÖM G. (1989). « Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code ». Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1989.
- [HUD 98] VON DER HUDE N. AND KAPP C. (1998). « Einsatz von Energiefählen am Beispiel des Main Tower in Frankfurt am Main ». Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 39, 1998.
- [KAP 97] KAPP C., EPF-Anlage Photocolor, Kreuzlingen. Teil 1 : Messergebnisse Nov. '96 - Okt. 97. Bericht im Auftrag des BEW, (NEK Umwelttechnik AG), 1997.
- [KLE 96] KLEIN S. A. ET AL., TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 14.2. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 1996.
- [KOS 96] KOSCHENZ M. AND DORER V., Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling. Roomvent'96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan, 1996.
- [LAL 92] LALOUI L., Comportement thermo-hydro-mécanique des milieux poreux anélastiques. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 230 p., 1992.
- [LAL 97] LALOUI L. & MODARESSI H., A Thermo-Mechanical Constitutive Model for Clays. " Computational Plasticity - Fundamentals and Applications ", Owen, Onate & Hinton (eds). Part 2, pp. 1696-1701, 1997
- [LAL 98] LALOUI L., MORENI M., STEINMANN G., FROMENTIN A., PAHUD D., Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques, Premier rapport intermédiaire, Office fédéral de l'énergie, Bern, Suisse, 1998.
- [LAL 99] LALOUI L., MORENI M., FROMENTIN A., PAHUD D. & STEINMANN G., Heat Exchanger Pile : Effect of the Thermal Solicitations on its Mechanical Properties. Proceeding European Geothermal Conference, Basel 1999.
- [LAL 99] LALOUI L., MORENI M., FROMENTIN A., PAHUD D. & VULLIET L., In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile. 4th International conference on Deep Foundation Practice, Singapore, 1999.

- [MOD 97] MODARESSI H. & LALOUI L., Thermo-viscoplastic model for clays. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol. 21 pp. 313-335, 1997
- [MOR 98] MORENI M., STEINMANN G., LALOUI L., VULLIET L., PAHUD D. AND FROMENTIN A., Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques, Rapport annuel, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse, 1998.
- [NIE 92] NIELD D. A. AND BEJAN A., Convection in Porous Media, Springer-Verlag, New-York, 1992.
- [PAH 93] PAHUD D., Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport Final. Groupe de Physique Appliquée (GAP - CUEPE), Université de Genève, Suisse, 1993.
- [PAH 96A] PAHUD D., FROMENTIN A. AND HADORN J.-C., The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM). User Manual. Internal Report. LASEN - DGC- EPFL, Switzerland, 1996.
- [PAH 96B] PAHUD D., FROMENTIN A. AND HADORN J.-C., The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS Used for the Simulation of Heat Exchanger Piles. User Manual, Internal Report. LASEN - DGC- EPFL, Suisse, 1996.
- [PAH 96C] PAHUD D. AND HELLSTRÖM G., The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS. In Proceedings of Eurotherm Seminar N° 49, A.A. van Steenhoven and W.G.J. van Helden (eds), pp. 127 - 136, Eindhoven, The Netherlands, 1996.
- [PAH 99] PAHUD D., FROMENTIN A. AND HUBBUCH M., Heat exchanger pile system for heating and cooling at Zürich airport. IEA Heat Pump Centre Newsletter, Volume 17 - No. 1/1999, pp. 15 - 16.
- [PAS 98] PASSERA & PEDRETTI, Pieux échangeurs - Sollicitations supplémentaires induites par les pieux échangeurs, Lugano, Suisse, 1998.
- [SCE 97] SCHEUSS U., Energiepfahlanlage Pago AG, Grabs. Zwischenbericht », Bundesamt für Energiewirtschaft, Programm Geothermie, Bern, Suisse, 1997.
- [SCH 93] SCHÄRLI U., Energiepfahlanlage Photocolor, Kreuzlingen. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, 127 Frühjahrstagung, 6. Mai 1993, pp. 9 - 12, 1993.
- [SIA 96] NORME SIA V192, Pieux. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 1996.

Annexe 1 : Modèles de calcul TRNVDSTP et TRNSBM

Le modèle de calcul TRNVDST, sur lequel est basé TRNVDSTP, et le modèle TRNSBM ont été développés à l'université de Lund en Suède [HEL 89, PAH 96C et ESK 86]. TRNVDST a été conçu pour simuler un stockage de chaleur ou de froid qui utilise directement le terrain pour emmagasiner l'énergie thermique. Les transferts de chaleur avec le terrain sont réalisés par un échangeur de chaleur placé dans le terrain ; (par exemple un ensemble de pieux échangeurs, de sondes géothermiques, etc.). TRNSBM a été conçu pour simuler l'extraction de chaleur du terrain par un ensemble de pieux échangeurs ou de sondes géothermiques. Les deux modèles peuvent simuler le même objet ; toutefois TRNVDST est plus apte à simuler un grand nombre de pieux ou de sondes, tandis que TRNSBM se limite à un nombre restreint (pour des raisons de durée de calcul et d'espace mémoire). Ces modèles de calculs ont été largement utilisés et validés par le passé [PAH 93, HEL 88 et ESK 87].

Les modèles de calcul TRNVDSTP et TRNSBM sont sommairement présentés de manière à montrer les objets qu'ils peuvent simuler, quelles sont les hypothèses de calcul et comment le problème thermique est résolu.

A1.1 *Le modèle TRNVDSTP*

Comme mentionné ci-dessus, TRNVDSTP permet de simuler un stockage de chaleur dans le terrain. Un échangeur de chaleur souterrain, formé par exemple par un ensemble de pieux échangeurs, est utilisé pour transférer de l'énergie thermique entre le fluide caloporteur, qui circule dans les pieux, et la zone du stockage, formée par le terrain compris entre les pieux. Le modèle permet de calculer la relation entre la température d'entrée du fluide (et son débit) et la puissance thermique transférée pour des conditions d'exploitation arbitraires.

Le modèle suppose un volume de stockage cylindrique dont l'axe est vertical. Les pieux échangeurs (ou sondes géothermiques, etc.) sont verticaux et uniformément placés dans ce volume. Ils peuvent être connectés en série de manière radiale, du centre au bord du stockage. Le transfert de chaleur par convection forcée du fluide caloporteur est couplé au transfert de chaleur transversal dans le terrain, traité par conduction pure. Une résistance thermique caractérise les transferts de chaleur entre le fluide caloporteur et le terrain sur le bord du pieu (équation A1.1), et l'équation de la chaleur les détermine dans le terrain (équation A1.2, coordonnées et symétrie cylindriques).

$$C_f \, m_f \, \frac{\partial T_f}{\partial s} + \frac{1}{R_b} \left(T_f - T \Big|_{\text{bord pieu}} \right) = 0 \quad \text{A1.1}$$

$$C \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad A1.2$$

T_f : température du fluide caloporteur ($^{\circ}\text{C}$) ;

s : coordonnée spatiale pour le chemin suivi par le fluide caloporteur (m) ;

$T_{bord\ pieu}$: température moyenne du terrain sur le bord du pieu échangeur ($^{\circ}\text{C}$) ;

$T(r, z, t)$: température du terrain, fonction des coordonnées spatiales r , z et temporelle t ($^{\circ}\text{C}$) ;

R_b : résistance thermique du fluide caloporteur ($\text{K}/(\text{W}/\text{m})$) ;

m_f : débit volumique du fluide caloporteur (m^3/s) ;

C_f : capacité thermique volumique du fluide caloporteur ($\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$) ;

C : capacité thermique volumique du terrain ($\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$) ;

λ : conductibilité thermique du terrain ($\text{W}/(\text{mK})$) ;

L'équation de la chaleur est résolue par la superposition de deux phénomènes, appelés problème local et problème global. Le problème local permet de solutionner les transferts de chaleur radiaux autour des pieux, induits par l'évolution temporelle récente des puissances thermiques injectées et soutirées. Comme le modèle suppose un nombre relativement élevé de pieux, la plupart sont entourés par d'autres pieux. Par symétrie, le calcul des transferts de chaleur radiaux se limite au volume de terrain associé à chaque pieu, représenté par un cylindre, pour lequel un flux de chaleur nul est prescrit sur sa frontière extérieure. Pour un intervalle de temps suffisamment long, qui correspondrait à l'équilibrage du champ de température si aucune puissance thermique n'était transférée durant cet intervalle, l'énergie thermique qui a été transférée par le pieu pendant l'intervalle de temps précédent est transmise au problème global (cf. ci-dessous), ce qui revient à corriger les champs de température respectifs des problèmes local et global. De cette manière, les champs de température associés au problème local ne conservent que les "perturbations" thermiques locales engendrées par les pieux.

Le problème global traite des transferts de chaleur à grande échelle dans le volume du stockage et le terrain environnant. Le flux de chaleur tridimensionnel est simulé avec un maillage bidimensionnel, par l'utilisation des coordonnées radiale et verticale. Les conditions initiales sont données par le champ de température initial du terrain. L'évolution de la température de l'air extérieur est donnée comme condition aux limites au problème global, de même que les transferts d'énergie engendrés par le problème local. Les problèmes global et local sont résolus par la méthode des différences finies explicites, chacun avec leur pas de temps propre, ajusté en fonction de leur maillage respectif et des propriétés thermiques du terrain.

Le modèle offre la possibilité de définir des couches de terrain horizontales avec des propriétés thermiques différentes. La prise en compte d'un écoulement de l'eau souterraine est effectuée sous la forme d'approximations, puisqu'une simulation détaillée ne permet pas d'utiliser la symétrie cylindrique dans les calculs. Pour estimer son influence sur le problème local, une conductibilité thermique effective

est évaluée sur la base du nombre de Nusselt associé à un cylindre allongé (un pieu), noyé dans un milieu poreux et soumis à un écoulement d'eau forcé transversal [NIE 92]. L'effet sur le problème global est simplement effectué par un calcul de transfert d'énergie thermique par convection sur la frontière du volume du stockage, qui est ensuite uniformément répercuté sur les températures du stockage. Deux méthodes sont proposées [PAH 96B]. Cependant, une comparaison avec un modèle de calcul détaillé ou des mesures expérimentales, afin de contrôler la précision et le domaine de validité des approximations, n'a pas pu être effectuée dans le cadre de cette étude.

La méthode utilisée pour calculer l'influence d'un mouvement de l'eau souterraine sur la quantité d'énergie extraite par les pieux échangeurs, représentée par la courbe de la figure 7, est basée sur la relation A1.3.

$$E_{\text{conv}} = u \cdot S \cdot C_w (T_{\text{mean out}} - T_{\text{mean in}}) \Delta t \quad (\text{A1.3})$$

*u : vitesse de Darcy moyenne dans la couche de terrain ($m^3_{\text{water}}/(m^2 s)$) ;
 S : section du stockage soumise à l'écoulement de l'eau, $S = H \cdot D$ (m^2) ;
 D : diamètre du stockage (m) ;
 H : extension verticale de la couche de terrain dans le volume de stockage (m) ;
 C_w : capacité thermique volumique de l'eau souterraine ($J/(m^3 K)$) ;
 $T_{\text{mean out}}$: température moyenne des mailles de terrain se trouvant juste à l'extérieur de la frontière du stockage et dans la couche de terrain concerné ($^{\circ}C$) ;
 $T_{\text{mean in}}$: température moyenne des mailles de terrain se trouvant juste à l'intérieur de la frontière du stockage et dans la couche de terrain concerné ($^{\circ}C$) ;
 Δt : pas de temps utilisé pour le calcul du problème global (s) ;
 E_{conv} : énergie thermique transférée par convection forcée dans le stockage durant le pas de temps Δt (J).*

Le pas de temps Δt doit être tel que l'avancement du front thermique pendant sa durée reste inférieur à l'extension radiale des mailles sur la frontière du stockage.

A1.2 Le modèle TRNSBM

Le modèle de calcul TRNSBM permet de simuler un ensemble de pieux échangeurs (ou sondes géothermiques), dont l'arrangement spatial en surface est arbitraire, de même que l'inclinaison de chacun des pieux (ils ne sont pas nécessairement verticaux). Le couplage hydraulique des pieux peut également être défini de manière arbitraire.

Dans chaque pieu, les températures du fluide caloporteur montant et descendant varient avec la profondeur et dans le temps. A une profondeur donnée, le transfert de chaleur par convection dans les pieux est compensé par le transfert de chaleur transversal entre le fluide et le terrain sur le pourtour du pieu. Un transfert de chaleur

par conduction pure est calculé par la résolution de l'équation de la chaleur dans le terrain. Le champ de température tridimensionnel du terrain est reconstruit par la technique de superposition, qui permet de traiter chaque pieu séparément avec un maillage bidimensionnel (rayon et profondeur). Les calculs utilisent la méthode des différences finies explicites pour résoudre l'équation de la chaleur en symétrie cylindrique. Les conditions initiales sont données par le champ de température initial du terrain. L'évolution de la température de l'air extérieur est donnée comme condition aux limites, en plus des conditions d'exploitation des pieux (débit et température du fluide caloporteur à l'entrée des pieux). Le modèle permet d'établir la relation entre ces deux grandeurs et la puissance thermique transférée dans le terrain.