

Les pieux énergétiques : étude de faisabilité

Ing. D. BOURGEOIS
ECAM – Bruxelles

Cette étude centralise différentes informations sur l'influence qu'entraîne la transformation d'un pieu classique en pieu énergétique sur son dimensionnement et sa mise en œuvre. Il y est aussi question de l'estimation des performances d'une installation de pieux énergétiques, de ses influences (sur le sol, les pieux eux-mêmes et le bâtiment qu'ils soutiennent) ainsi que d'une analyse coûts/bénéfices d'un tel projet.

Mots-clefs : économies d'énergie pour nouvelles constructions, pieux énergétiques, géothermie, échange de chaleur, pompe à chaleur, dimensionnement

The aim of this report is to centralize different informations on the influence of the transformation of a classical pile in an energy-giving pile on its design and its set-up. An estimation of the performances of an energy-giving piles installation, its different influences (on the ground, on the piles themselves and on the building they are supporting) as well as a cost/benefits analysis of such a project are also provided.

Keywords : energy savings for new buildings, energy-giving piles, geothermal, heat exchange, heat pump, design

1. Introduction

Nos soucis et connaissances sur l'environnement et sur les ressources naturelles grandissent d'année en année. A ce jour, notre consommation et notre utilisation des énergies fossiles sont au centre de nombreuses réflexions. Leurs substituts, les énergies renouvelables, ne cessent de gagner en importance. Le domaine de la construction joue un rôle primordial dans la diminution des quantités d'énergie utilisée (isolation, vitrage, ventilation, etc.) et dans leurs provenances (solaire, éolien, géothermie, etc.). L'évolution des prix des matières fossiles pousse à une utilisation plus importante de toutes les techniques mises à notre disposition.

De nos jours, aucune énergie alternative ne semble pouvoir remplacer intégralement les énergies fossiles et le nucléaire. Par contre l'utilisation optimale de l'ensemble de toutes les techniques alternatives pourrait un jour remplacer cette dépendance. Notre étude voudrait déterminer dans quelle mesure le recours à des pieux énergétiques peut participer aux défis qui s'offrent à notre société.

Un pieu énergétique ou pieu échangeur a, contrairement à un pieu classique, deux fonctions. La première est de reprendre des charges et donc d'assurer la stabilité de la construction qu'il supporte. Sa deuxième fonction est d'assurer à coûts énergétiques très réduits, par l'ajout de tubes échangeurs dans le pieu, le réchauffement ou le refroidissement du bâtiment. Les tubes échangeurs se trouvant dans les pieux permettent une captation ou une injection de chaleur dans le sol grâce à une pompe à chaleur.

Le but de cet article est de faire découvrir les avantages et limites des pieux énergétiques. L'objectif est donc d'améliorer nos connaissances sur ce système et de donner des pistes de réflexion afin d'encourager le recours à cette solution, d'orienter la recherche en vue de l'amélioration de ses performances et du perfectionnement des techniques de leur mise en œuvre.

2. Les pieux énergétiques

2.1 Principe général

Le pieu énergétique, ou pieu échangeur, est un pieu classique, qui permet de supporter des charges, mais il est parcouru par un réseau de tubes. Ce réseau de tubes permet de capter l'énergie du sol grâce au liquide caloporteur contenu dans celui-ci. Les différents réseaux sont reliés ensemble à une pompe à chaleur.

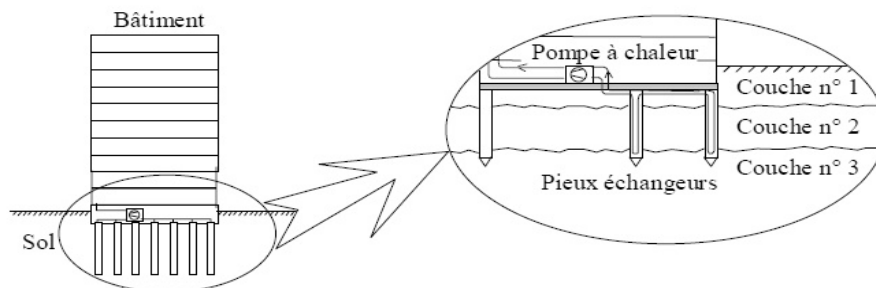


Figure 1 : Vue d'ensemble

L'utilisation de pieux énergétiques se fera uniquement pour les bâtiments déjà prévus sur pieux étant donné le coût élevé de leur réalisation. On utilise un système de fondation profonde quand une fondation superficielle ne peut combler certains problèmes techniques (pouvoir portant, déformation) ou économiques. L'augmentation du prix des énergies et l'amélioration des techniques de construction et de mise en place des pieux rendront peut-être un jour ce dernier critère négligeable. Des pieux déjà existants ne peuvent être transformés en pieux énergétiques, ce système ne convient donc pas pour la rénovation.

Les types de construction sur pieux sont généralement de grands bâtiments à vocation publique, industrielle ou à appartements. Ce type de bâtiments a, selon les périodes de l'année, de grands besoins de chauffe ou de refroidissement, ce qui convient bien à première vue aux pieux énergétiques. Pour les projets individuels ou de petite taille un système de captation classique (horizontale ou verticale) est plus intéressant.

Le nombre de pieux, leur longueur et leur diamètre sont fonction des règles de dimensionnement. La surface d'échange totale sera donc fixée par la dimension du bâtiment.

L'ajout de la fonction d'échangeur de chaleur à un élément de structure peut se faire avec tous les éléments en contact avec le sol. La capacité de stockage et la conductivité thermique du béton et du béton armé sont idéales pour absorber les calories du terrain. Ce travail n'étudie que les pieux mais les murs de soutènement, les tunnels, les parois moulées, etc, peuvent aussi être transformés en géostructures énergétiques.

2.2 Les différents composants

Le système de captage

Le système de captage doit être réalisé dans un matériau stable au cours du temps avec de bonnes propriétés thermiques et doit pouvoir résister au chaud, au froid, à la corrosion et au béton. Il doit avoir aussi une bonne résistance aux produits chimiques, une faible résistance hydraulique et un prix attractif. Le polyéthylène est un matériau qui possède une grande partie de ces propriétés et est donc le matériau le plus utilisé pour les échanges de chaleur. Mais sa conductivité thermique étant assez mauvaise, il faut que son épaisseur soit réduite au minimum mais elle doit toujours être suffisante pour résister aux efforts qui le sollicitent. C'est logiquement le diamètre et la longueur du pieu qui influencent son épaisseur. Les tubes échangeurs ont une épaisseur tournant autour de 1,5 à 2,5mm pour un diamètre extérieur variant de 16 à 32mm.

Les tubes sont placés en U, leur nombre variant en fonction du diamètre du pieu. En effet le diamètre permet de modifier l'espacement entre les tubes. Cet espacement doit suivre certaines règles pour avoir un rendement idéal

Le fluide caloporteur

Les calories sont transportées du sol vers la pompe à chaleur par le fluide caloporteur. Ce fluide circule en circuit fermé entre les pieux et un collecteur relié à la pompe à chaleur. Le fluide est composé soit d'eau claire soit d'un mélange d'eau et d'antigel. L'eau claire n'est que rarement utilisée car il y a un risque de gel de l'échangeur de chaleur. Si le liquide n'est utilisable qu'à certaines périodes, la durée d'utilisation du système diminue. Le mélange d'eau et glycol (20 à 30%) permet une utilisation permanente du système.

Le système de chauffage

Les calories transportées par le fluide caloporteur jusqu'à la pompe à chaleur sont transférées par celle-ci au fluide de chauffage (généralement de l'eau chaude). L'eau chaude peut être utilisée pour les systèmes de chauffage à basse température (du type plancher chauffant) ou pour les systèmes sanitaires.

3. Dimensionnement

L'intégration dans un projet d'un tel système doit se faire dès le départ car il n'est plus possible de le modifier pendant la construction. Les caractéristiques du bâtiment et du sol comme par exemple le nombre, la dimension et le type de pieux, les caractéristiques thermiques du sol, les besoins énergétiques du bâtiment et l'hydrogéologie locale doivent être connus le plus précisément possible pour une intégration optimale des pieux énergétiques.

Le calcul de la quantité d'énergie pouvant être extraite ou injectée dans le sol pour satisfaire tout ou partie des besoins thermiques du bâtiment, c'est-à-dire la détermination des performances énergétiques d'un groupe de pieux énergétiques, demande une connaissance approfondie des éléments suivants :

- Les caractéristiques (propriétés thermiques et hydrogéologie local) du terrain ;
- Le type, les dimensions et les quantités des éléments de fondation ;
- Les caractéristiques de la (ou des) pompe(s) à chaleur ;
- La conception et les besoins énergétiques du bâtiment.

3.1 Caractéristiques géologiques et hydrologiques

Pour définir au mieux le potentiel du sol il faut connaître entre autres ces caractéristiques géologiques : la présence ou non de nappe d'eau souterraine, son humidité et sa température. Il faut également connaître ces caractéristiques thermiques et d'écoulement :

Type de sol	Perméabilité k (m/s)	Conductivité thermique λ (W/mK)		Capacité thermique volumique C_v (MJ/m ³ K)	
		<i>sec</i>	<i>saturé</i>	<i>sec</i>	<i>saturé</i>
<i>Argile</i>	$10^{-8} - 10^{-10}$	0,2 – 0,3	1,1 – 1,6	0,3 – 0,6	2,1 – 3,2
<i>Limon</i>	$10^{-5} - 10^{-8}$	0,2 – 0,3	1,2 – 2,5	0,6 – 1,0	2,1 – 2,4
<i>Sable</i>	$10^{-3} - 10^{-4}$	0,3 – 0,4	1,7 – 3,2	1,0 – 1,3	2,2 – 2,4
<i>Gravier</i>	$10^{-1} - 10^{-3}$	0,3 – 0,4	1,8 – 3,3	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4

Figure 2 : Caractéristiques des différents sols

L'observation de ces ordres de grandeur nous permet de faire certaines constatations. Premièrement le sol possède de très bonnes propriétés de stockage de la chaleur. Sa chaleur spécifique volumique C_v varie de 0,3 à 3,2 MJ/m³K (à comparer avec $C_v = 0,036$ MJ/m³K pour un isolant et $C_v = 3,9$ MJ/m³K pour de l'acier). Et sa conductibilité thermique λ s'étend de 0,2 à 3,3 W/mK (à comparer avec $\lambda = 0,04$ W/mK pour un isolant et $\lambda = 45$ W/mK pour l'acier). Deuxièmement on constate que la présence d'eau favorise fortement les propriétés thermiques λ et C_v . Cette augmentation s'explique par la plus grande conductibilité de l'eau par rapport à celle de l'air.

La vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol influence directement le stockage de l'énergie thermique produite par un groupe de pieux énergétiques. Lorsque l'on se trouve dans une zone traversée par une nappe d'eau souterraine dont l'écoulement a une vitesse de Darcy de l'ordre de 0,5 à 1 m/jour le stockage n'est plus possible. Cette vitesse d'écoulement disperse l'énergie réinjectée par les pieux et donc empêche le stockage de l'énergie dans le sol. Cette caractéristique va engendrer certaines limites d'utilisation des pieux énergétiques.

Test de réponse thermique

Les différents paramètres exposés précédemment ont une importance capitale dans le dimensionnement d'un ensemble de pieux énergétiques. C'est pour cela que leur détermination doit être la plus précise possible. Utiliser des valeurs standards ou des résultats de laboratoire sur de petits échantillons ne peut permettre une approche des caractéristiques réelles du sol et particulièrement lorsque l'on parle de la conductivité thermique λ .

Le test de réponse thermique permet de déterminer ces paramètres d'une manière précise et sur le site exact de l'application. De ce fait, le coefficient de conduction de chaleur du sous-sol est obtenu comme une valeur effective sur toute la longueur de la sonde en tenant compte des flux d'eau souterraine réels. Une détermination correcte de ce paramètre permet d'obtenir un dimensionnement et donc une installation fiable et optimale.

3.2 Caractérisation thermique d'un pieu énergétique

La résistance thermique du pieu R_b [K/(W/m)] permet, en régime stationnaire, de chiffrer l'écart de température entre le fluide circulant dans le pieu et le terrain sur son pourtour et pour une puissance transférée connue. En d'autres termes, pour une extraction de chaleur donnée, il se crée une différence de température entre le fluide et le terrain et ce indépendamment des conditions géologiques et hydrologiques locales. Cette différence de température peut atteindre facilement plusieurs degrés, dans un cas défavorable elle peut même atteindre une dizaine de degrés. Pour un tube cylindrique et dans l'hypothèse d'un écoulement de chaleur radial, la résistance thermique par mètre R [K/(W/m)] est donnée par la relation suivante :

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi\lambda}$$

r_e : rayon extérieur du cylindre

r_i : rayon intérieur

λ : conductibilité thermique du matériau constitutif (W/mK)

Q : flux de chaleur

ΔT : différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du tube

Un pieu massif, avec un diamètre variant entre 30 et 140 cm, a une résistance thermique stable qui évolue en fonction du nombre de tubes s'y trouvant.

Voici quelques valeurs de résistance thermique de pieu (pour un béton de conductivité thermique de 1,8 W/mK et un régime d'écoulement laminaire) :

- 0,15 [K/(W/m)] pour un pieu creux équipé avec un double U
- 0,10 – 0,11 [K/(W/m)] pour un pieu massif équipé avec un double U

- 0,07 – 0,08 [K/(W/m)] pour un pieu massif équipé avec un triple U
- 0,06 [K/(W/m)] pour un pieu massif équipé avec un quadruple U

3.3 Caractérisation d'un ensemble de pieux énergétiques

Le paramètre fondamental à connaître est la capacité de transfert U_A car il permet la détermination du potentiel de chauffage ou de refroidissement du système.

Capacité de transfert U_A (W/K): puissance thermique que l'on peut transférer dans le terrain, une fois un régime stationnaire établi, pour une différence de température de 1 K entre la température moyenne du fluide caloporteur et la température moyenne du terrain.

La capacité de transfert d'un ensemble de pieux énergétiques se calcule par la formule suivante :

$$U_A = \frac{n \cdot H}{R_{fs}}$$

n : nombre de pieux échangeurs

H : la longueur active d'un pieu énergétique (m)

La résistance thermique en flux stationnaire se calcule par la relation :

$$R_{fs} = \frac{1}{2\pi\lambda_{terrain}} \left\{ \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right]^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_b}\right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{2(r_1^2 - r_b^2)} \right\} + R_b$$

R_{fs} : résistance thermique « pieu + terrain » en flux stationnaire [K/(W/m)]

$\lambda_{terrain}$: conductibilité thermique du terrain (W/mK)

r_b : rayon des pieux (m)

$r_1 = B/\sqrt{\pi}$: rayon du volume de terrain associé à un pieu (m)

B : espacement moyen entre les pieux (m)

R_b : résistance thermique des pieux échangeurs [K/(W/m)]

La puissance thermique transférée par l'ensemble des pieux est proportionnelle à leur capacité de transfert et à la différence de température entre le fluide et le terrain en situation de flux stationnaire :

$$P = U_A(T_f - T_m)$$

P : puissance thermique injectée ou extraite par les pieux énergétiques (W)

T_f : température moyenne du fluide (°C)

$T_f = (T_i - T_0)/2$; T_i et T_0 : température d'entrée et de sortie du fluide dans les pieux (°C)

T_m : température moyenne du terrain dans la zone perturbée par les pieux énergétiques (°C)

On peut trouver, pour un pré-dimensionnement, la longueur des pieux à équiper en échangeur ou inversement déterminer l'apport énergétique réalisable par les pieux en partant de la puissance thermique par mètre de pieu.

3.4 Recommandations

Voici un résumé des recommandations pour un avant-projet. Elles sont tirées des enseignements que l'OFEN (Office Fédéral de l'Energie en Suisse) a engendrés en étudiant, en modélisant et en réalisant des projets de pieux énergétiques.

- La température du fluide caloporteur ne peut jamais descendre en dessous de 0°C, sinon risque de gel du sol ;
- Une recharge thermique n'est pas nécessaire s'il y a un écoulement souterrain supérieur à 0,5 – 1m/jour ;
- S'il n'y a pas d'écoulement souterrain il faut une recharge thermique ;
- La recharge du sol doit être équivalente à au moins 80% de l'énergie extraite ;
- 2m² de plancher peuvent être chauffé par 1m de pieu ;
- S'il n'y a pas d'écoulement souterrain, on peut extraire pour les besoins de chauffe entre 25 et 40W/m de pieu, l'énergie annuelle est comprise entre 60 et 80kWh/m/an ;

- S'il n'y a pas d'écoulement souterrain ni besoins en refroidissement direct on peut estimer la puissance frigorifique à 30W/m de pieu, l'énergie frigorifique annuelle est comprise entre 50 et 680kWh/m/an ;
- Ces valeurs peuvent être augmentées de 50% par la présence d'un écoulement souterrain.

3.5 Comportement thermomécanique

Avant de pouvoir commencer les étapes de dimensionnement, comme expliqué dans les points précédents, la géométrie (hauteur et diamètre) des pieux est à connaître. La première étape est donc de dimensionner les pieux de fondation selon les méthodes classiques. Mais il serait intéressant de pouvoir estimer les contraintes et les efforts supplémentaires induits dans le pieu suite à sa transformation en pieu énergétique et donc de savoir s'il faut modifier le dimensionnement des pieux. La dilatation, les efforts thermiques et le cisaillement seront les trois aspects abordés.

Dilatation

Les pieux seront soumis au cours de leur utilisation à des variations de températures, dues à l'extraction ou à l'injection de chaleur dans le sol, ce qui entrainera leur dilatation ou leur contraction. Ce phénomène risque d'entraîner des efforts supplémentaires dans le pieu et dans la structure du bâtiment, il faut particulièrement faire attention aux pieux se trouvant sur le périmètre extérieur de la zone construite. Les pieux intérieurs s'influencent entre eux et donc leurs déplacements sont identiques, contrairement aux pieux extérieurs qui subissent une influence moindre, donc des déplacements différents.

Si l'on prend l'hypothèse que le pieu est libre de se déformer, on peut estimer leur allongement par la formule suivante :

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

α : coefficient de dilatation thermique moyen d'un pieu (K^{-1})

ΔT : variation de température ($^{\circ}C$)

Le coefficient de dilatation pour un pieu est de 10^{-5} K^{-1} . Ce qui nous donne comme exemple pour un pieu de 24 m, un allongement de 2,4 mm pour une variation de température de 10°C . Comparée à la valeur de tassement acceptée pour les éléments de maçonnerie (2,5 à 5 cm), cette valeur ne pose pas de problème, mais il ne faut évidemment pas oublier d'ajouter à ce tassement celui dû à la charge du bâtiment. Il faut aussi remarquer qu'en réalité les pieux ne sont pas libres (frottement sol-pieu et charge du bâtiment) et donc que les valeurs obtenues sont trop grandes.

La différence de température entre les pieux extérieurs et intérieurs entraîne des tassements différents. Si l'on prend un déplacement nul pour les pieux extérieurs (cas extrême) et un déplacement de 2,4 mm pour les pieux intérieurs on peut estimer la distorsion locale à $4 \cdot 10^{-4}$.

$$\textit{Distorsion locale} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{D}$$

D : espacement entre les deux pieux (m)

La distorsion d'un bâtiment provoque de nombreux dégâts, souvent bien supérieurs à ceux du tassement total. La valeur pour les bâtiments en béton armé tourne entre $2,5 \cdot 10^{-3}$ et $4 \cdot 10^{-3}$. Comme pour le tassement, l'hypothèse que les pieux sont libres nous donne des valeurs supérieures aux valeurs réelles. La prise en compte des dilatations ne semble donc pas nécessaire lors du dimensionnement des pieux.

Efforts thermiques

Le poids du bâtiment sollicite mécaniquement le pieu et l'extraction ou l'injection de chaleur le sollicite thermiquement, ces deux sollicitations entraînent des efforts dans le pieu. Les contraintes, dues à la charge statique du bâtiment, sont de nos jours très bien connues et le dimensionnement des pieux ne pose aucun problème. Au contraire des contraintes liées à l'extraction ou l'injection de chaleur qui elles ne sont pas encore parfaitement maîtrisées.

Pour mieux comprendre et estimer les efforts induits par cette variation de températures dans les pieux, la technique utilisée est de partir d'un pieu-test traversant plusieurs couches de sol parfaitement connues et de lui soumettre deux types de sollicitations : mécanique et thermique. La charge mécanique

est celle du bâtiment et la charge thermique est due à la circulation d'eau chaude dans les tubes du pieu. Pour accentuer les efforts, les sollicitations sont alternées, c'est-à-dire que l'on considère le bâtiment en construction et qu'après la fin de la réalisation de chaque étage un cycle thermique (ΔT de 10 à 15 °C) est imposé au pieu. L'étude des champs et des déformations thermiques et du soulèvement du pieu permet une meilleure compréhension des efforts induits dans le pieu.

Au point précédent le pieu était libre de se déplacer, mais s'il n'est pas entièrement libre de se déplacer (frottement latéral, bords bloqués,...) une partie ou la totalité de la déformation sera empêchée. Comme on peut le voir dans les formules qui suivent les efforts sont liés à la déformation gênée ε_g , à la déformation libre ε_l et à leur rapport n .

$$n = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_l}$$

Le rapport n varie entre 1 pour un pieu libre et 0 pour un pieu bloqué. On peut trouver les déformations libres et gênées par les formules suivantes :

$$\varepsilon_l = \alpha \cdot \Delta T \quad \varepsilon_g = n \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

α : coefficient de dilatation thermique du pieu (K^{-1})

ΔT : variation de température (°C)

La contrainte verticale (compression) qui équilibre la réaction verticale créée par cette différence entre la déformation libre et gênée est égale à :

$$\sigma = -E_{\text{pieu}} \cdot (\varepsilon_l - \varepsilon_g)$$

Mais elle est fonction de la couche de sol traversée et donc de n_i le taux de liberté correspondant à la couche i :

$$\sigma = -E_{\text{pieu}} \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot (n_i - 1)$$

Cette contrainte nous permet de trouver la charge d'origine thermique Q_T à ajouter dans le pieu en plus de celle due à la charge mécanique Q_m :

$$Q_T(z) = E_{\text{pieu}} \cdot (n - 1) \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot A(z)$$

La charge totale Q_{TOT} induite dans le pieu est égale à :

$$Q_{TOT} = Q_T + Q_m$$

Le système de chargement est fortement contraignant pour les pieux et il n'est que très peu réaliste car la mise en fonction des pieux ne se fait qu'à la fin de la construction du bâtiment et le cycle thermique, avec des différences de 10 °C en une fois, n'est pas une représentation de ce qui se passe en réalité. Mais il permet de répondre à certaines questions et donc de mieux comprendre l'effet de la température dans un pieu.

Les conclusions que l'on peut tirer sont les suivantes :

- L'intensité de la déformation dépend de la couche de sol traversée
- La nature uniforme des effets thermiques sollicite plus fortement la pointe du pieu contrairement aux efforts de la charge mécanique qui se concentrent en tête du pieu et s'atténuent avec la profondeur.
- L'opposition des directions de mouvement (soulèvement pour la thermique et tassement pour la statique) montre que la température n'affecte pas l'adhérence, et qu'un soulagement de la mobilisation du frottement latéral est noté en phase d'échauffement.

Un pieu énergétique ne subit donc pas les mêmes efforts qu'un pieu classique et il faut donc en tenir compte, ce qui entraîne une légère modification du dimensionnement du pieu. Les formules présentées permettent une estimation de la contrainte supplémentaire qu'engendre la thermique dans le pieu.

Cisaillement

Dans un pieu énergétique l'extraction de chaleur doit toujours se faire de manière symétrique, pour que les différences de température dans le pieu soient minimales et donc que les efforts de cisaillement soient également faibles. Si l'extraction se fait de manière dissymétrique (défaillance d'un tube par exemple) le risque de dégât est important sur les performances du système et engendre des efforts de cisaillement. Selon des simulations il y aurait 5 fois plus d'effort de cisaillement dans un pieu avec une extraction dissymétrique que dans un pieu avec extraction symétrique. Ces

modélisations ont été réalisées avec des hypothèses très défavorables (2 zones de températures au lieu d'une variation progressive) mais elle permet quand même de dire qu'il est fortement conseillé de ne pas faire de l'extraction dissymétrique dans un pieu. La mise en place de systèmes de vérification électronique et de circuits indépendants semble être une disposition nécessaire lors de l'installation d'un système de pieux énergétiques.

4. Intérêts et obstacles

4.1 Intérêts et obstacles environnementaux

- Les pieux énergétiques utilisent la capacité du sol à stocker de l'énergie. Une utilisation optimale de ce stock, bien qu'épuisable, permet de fortement limiter sa dépendance aux énergies non renouvelables (la quantité d'énergie électrique nécessaire est en effet 3 à 4 fois inférieure à la quantité d'énergie mise à disposition).
- L'exploitation de la géothermie permet la production d'une énergie respectueuse de l'environnement. Les pieux énergétiques ne présentent apparemment aucun risque de pollution autres que ceux liés à la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur et à la fabrication et au transport des matériaux. Le coût environnemental du transport et de la fabrication n'est certainement pas supérieur à celui des autres systèmes de chauffage fonctionnant à partir des énergies fossiles ou du nucléaire. Une pompe à chaleur permet une réduction d'environ 50 % des rejets de CO₂ par rapport à un chauffage traditionnel au mazout. Si cette pompe à chaleur est reliée à un système de production d'énergie renouvelable cette production de CO₂ peut être fortement réduite.
- Le risque d'affecter les nappes aquifères (court-circuit entre aquifères, fuites de liquide caloporteur, barrage hydraulique) ainsi que la stabilité des sols et des bâtiments est présent. Une étude approfondie du sol est nécessaire pour un travail de qualité.
- Le fluide frigorigène qui circule dans la pompe à chaleur présente un certain risque d'effet de serre. Si la pompe à chaleur est, en fin de vie,

recyclée comme le sont les frigos, il ne devrait pas y avoir de problème. En outre, des fluides frigorigènes neutres pour l'environnement sont en développement.

- On peut aussi noter que cette technique ne nécessite pas de transport de matières premières vers les consommateurs (livraison de mazout), ni d'installation d'infrastructures de grande ampleur (gazoducs).

4.2 Intérêts et obstacles techniques

- Un des principaux obstacles aux pieux énergétiques est que cette technique n'est applicable qu'aux nouvelles constructions. A posteriori il n'est pas possible d'équiper des pieux existants. De plus leur utilisation est destinée, pour le moment, uniquement aux bâtiments qui nécessitent la mise en place de pieux pour assurer leur stabilité.
- Le principe général des pieux énergétiques est basé sur la température plus ou moins constante du sous sol. Cette température est dans notre pays constamment supérieure à la température moyenne de l'air en hiver et inférieure à celle-ci en été. Les pieux sont alors utilisés pour le chauffage en hiver et pour le refroidissement en été. Cette double possibilité est très intéressante pour les bâtiments qui ont une production interne de chaleur importante et qui, de ce fait, nécessitent un refroidissement important. Cette technique peut donc être très intéressante dans les régions et pays où le refroidissement est généralisé et concerne une part très importante de l'année. Au contraire du système étudié ici, il faudrait vérifier que le sol peut absorber sans discontinuité les calories qui y seraient injectées.
- Les caractéristiques thermiques et hydrogéologiques limitent fortement les performances énergétiques du système. Avant l'équipement des pieux, il est primordial de connaître le plus fidèlement possible ces différents paramètres
- La pompe à chaleur permet que l'énergie dépensée soit approximativement égale au quart de l'énergie produite. Cependant il est fortement recommandé d'utiliser cette technique de production de chaleur dans des bâtiments bien isolés et avec un système de distribution à basse température.

- La durée de vie d'une installation de pieux énergétiques est estimée à 100 ans, ce qui est suffisant vu la durée de vie des bâtiments actuels.

4.3 Intérêts et obstacles économiques

- Le surcoût engendré par la transformation des pieux en pieux énergétiques est faible pour un bâtiment nécessitant, de toute façon, la réalisation de pieux et utilisant un système de chauffage et/ou de climatisation traditionnel.
- Les performances des pieux énergétiques reposent sur la bonne connaissance des propriétés thermiques du sol. Cependant les incertitudes qui entourent ces propriétés sont plus importantes que les incertitudes sur le potentiel énergétique du gaz ou du mazout. Cet aléa géologique induit des risques financiers que beaucoup d'investisseurs pourraient hésiter à prendre.
- L'exploitation des sources de chaleur et de froid à moindre coût est maintenant possible mais cela ne doit pas nous faire perdre de vue l'importance de l'isolation des bâtiments. Dans notre pays froid ou tempéré, les calories ou frigories les moins chères seront toujours celles que nous ne devons pas produire.
- Les systèmes fonctionnant avec des combustibles fossiles ont des frais d'exploitation plus importants (nettoyage et révision de citernes, contrôle et ramonage de cheminée) que les systèmes de pompe à chaleur.
- Par rapport aux sondes verticales qui requièrent des forages coûteux et qui ne sont réalisées qu'en vue de répondre aux besoins énergétiques du bâtiment, les pieux énergétiques permettent de répondre à ces besoins tout en assurant la stabilité du bâtiment.
- Pour des besoins identiques le prix de l'équipement d'un ensemble de pieux est plus ou moins similaire au prix de l'installation de sondes verticales. Mais en contre-partie les sondes verticales sont plus faciles à mettre en œuvre et moins risquées (elles restent accessibles et on ne touche pas aux fondations).

- La mise en œuvre de systèmes excédentaires pourrait donner lieu à la distribution d'énergie « gratuite » dans les bâtiments environnants, ceux-ci permettant aussi, le cas échéant, la recharge du stock (augmentation de la température du sol) pendant la saison chaude.

4.4 Obstacle juridique

- Le refroidissement du sous-sol pouvant s'étendre au-delà des aplombs des limites du bâtiment, il se pourrait que la mise en œuvre de ce type de pieux donne lieu à de nouveaux conflits de voisinage, le voisin se sentant lésé du fait d'un sous-sol plus froid et affublant le système de chauffage par pieux énergétiques de « voleur de calories »

5. Conclusion

Nous pouvons, à présent, faire plusieurs constats. Premièrement, le rôle principal de ce système de fondations reste d'assurer la stabilité du bâtiment. En effet, les économies énergétiques ne permettent pas, à elles seules, de justifier le recours à ce type de fondation.

Deuxièmement, les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des sols revêtent une importance primordiale car elles conditionnent la qualité des échanges thermiques entre le sol et les pieux énergétiques, et donc la décision d'utiliser cette technique.

Troisièmement, la position et le nombre des tubes ainsi que les propriétés des matériaux constitutifs, bien qu'ayant une influence moindre sur les performances, peuvent être optimisés afin de maximiser les échanges entre le fluide caloporteur et le terrain.

Finalement, ce type d'énergie paraît indissociable des pompes à chaleur et d'un système de chauffage/refroidissement à basse température.

Tout projet devra donc tenir compte de ces différents aspects et les analyser dans une suite logique. L'ordre serait donc, après l'étude du sous-sol et la détermination de ses caractéristiques, d'effectuer les simulations permettant de déterminer les quantités d'énergies disponibles. Connaissant ces contraintes, le projet devra s'y adapter (légèreté de la structure, isolation du

bâtiment, système de ventilation, surchauffe disponible), faute de quoi il faudra supporter les frais occasionnés par l'installation d'un système de chauffage complémentaire.

En définitive, les pieux énergétiques sont, certes, intéressants dans le contexte de la recherche d'énergie de substitution, mais ils ne peuvent être considérés comme le système permettant d'utiliser à grande échelle la formidable source d'énergie qui est stockée dans la croûte terrestre. En effet, ce mode d'utilisation de la géothermie est trop lié au type de sous-sol et à une certaine taille de bâtiments (le recours aux pieux se justifie rarement dans le cadre d'une maison unifamiliale). Toutefois, notre étude nous a persuadé que, pour les bâtiments répondant à ces conditions, il est souhaitable de recourir à cette technique pour le bien-être de notre environnement.

Par ailleurs, nous avons constaté que les possibilités de recherches complémentaires sont nombreuses. Il serait intéressant d'élaborer, sur base des critères de faisabilité, des cartes reprenant les zones favorables à l'implantation de ce système. Il serait également utile de comparer plus précisément les systèmes de pieux énergétiques aux systèmes traditionnels tant du point de vue de leur empreinte écologique que du point de vue économique.

En partant des connaissances engendrées grâce aux pieux énergétiques il serait également intéressant de savoir quels sont les éléments de fondations (fouille blindée, mur emboué, etc.) ou les éléments enterrés (parkings, tunnels, etc.) qui peuvent être transformés en échangeur. Une étude approfondie permettrait de faire un listing des modifications à apporter à ces éléments pour qu'ils puissent aussi jouer le rôle d'échangeurs de chaleur. Une adaptation de cette technique aux infrastructures routières, ferroviaires, etc. permettrait également un dégivrage non agressif.

6. Sources

- [1] BONVIN M., CORDONIER P. (2002). *Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure*. Sion : Office fédéral de l'énergie.
- [2] BOURGEOIS D. (2011). *Les pieux énergétiques : étude de faisabilité*. Bruxelles : ECAM.
- [3] CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). (2007). *Conception de fondations géothermiques : rapport final*. Champs-Sur-Marne : CSTB.
- [4] FROMENTIN A., PAHUD D., JAQUIER C., MORATH M. (1997). *Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs*. Lausanne : Office fédéral de l'énergie.
- [5] LALOU L., MORENI M., VULLIET L. (2003). *Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur*. Canada : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [6] TYBERGHEIN G. (2005). *Etude du comportement des pieux échangeur de chaleur*. Liège : Université de Liège.