

La mise en place de pieux géothermiques permet l'utilisation à des fins énergétiques, d'éléments structuraux, par ailleurs nécessaires pour des raisons statiques et réalisés hors les considérations énergétiques. Les pieux géothermiques ont donc deux fonctions. Celle liée au chauffage et à la production d'eau chaude, abordée dans la ressource « *Les pieux de fondations géothermiques* », a permis d'expliquer la réponse du sol par rapport au prélèvement de chaleur, d'estimer l'impact du prélèvement de chaleur sur l'environnement et d'évaluer les performances du système thermodynamique ; la deuxième fonction liée aux fondations du bâtiment, nécessaires aux descentes de charges et à la portance du bâtiment, est abordée ici.

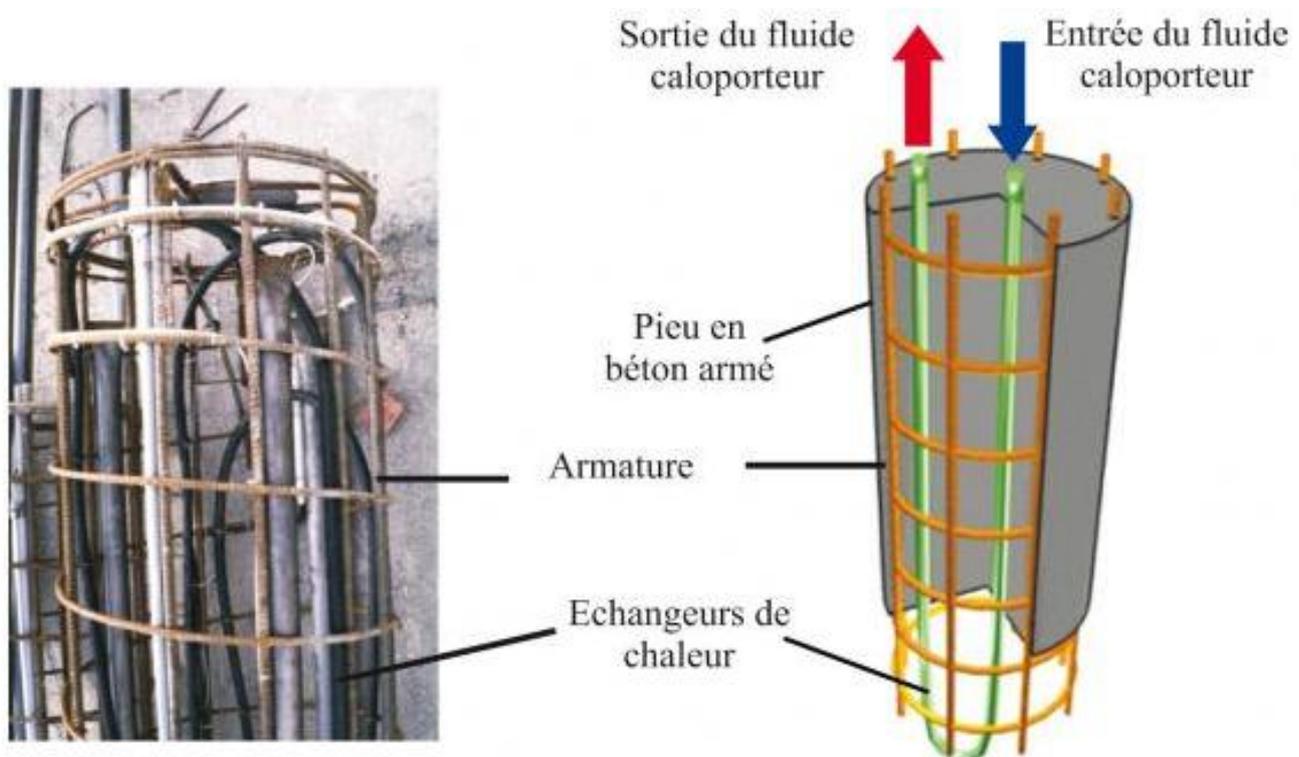


Figure 1 : Equipement d'un pieu géothermique
Image Espazium [1]

Cette ressource a pour objectifs de présenter la structure des pieux, leur comportement thermomécanique ainsi que les moyens de mise en œuvre.

1 – Structure des pieux

L'échange de chaleur entre le sol et le bâtiment est réalisé par un système de tubes en double U disposés à l'intérieur de la structure ; dans ce tube circule un fluide caloporteur (figure 1). La constitution des pieux géothermiques est de même type que les pieux de fondation en béton renforcé d'une armature, à l'exception que celle-ci est équipée des tubes de géothermie (figure 2).



Figure 2 : Ferrailage et circuit d'eau d'un pieu géothermique

Considérons une modélisation simplifiée double U. La nappe échange avec un élément linéaire située sur z à température uniforme, moyenne des températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur mais variable avec le temps. Le double U tend à réaliser une moyenne de la température le long de l'échangeur, ce qui justifie l'hypothèse d'une température du pieu considérée comme uniforme (figure 3). La température des « nœuds sources » est la température moyenne du pieu.

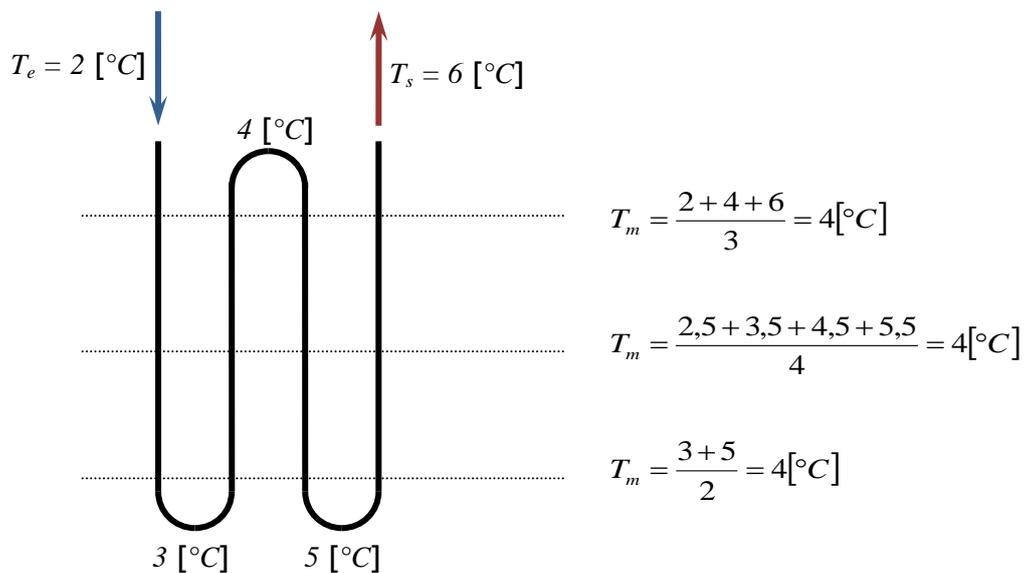


Figure 3 : Schématisation de l'hypothèse de température constante dans le pieu

2 – Comportement thermomécanique

L'intégration des pieux géothermiques doit se faire en début de projet, la modification n'est ensuite plus envisageable. A l'aide des caractéristiques du bâtiment et de celles du sol, il est possible de déterminer les dimensions des pieux ainsi que leur nombre.

Les pieux géothermiques se dimensionnent comme tout pieu de fondation classique (cf. Eurocode 7) néanmoins il est nécessaire de prendre en compte la charge thermomécanique.

2.1 - Charges thermomécaniques

Les pieux géothermiques sont soumis à des cycles thermiques liés au soutirage de chaleur et à la régénération du sol en été. Les pieux sont ainsi soumis à un chargement thermomécanique qui se traduit par des déformations supplémentaires. Le sol s'opposant à ces déformations, génère alors des contraintes additionnelles dans les pieux. Les variations cycliques de température dues aux pieux ont aussi un effet sur le comportement thermomécanique du sol. Le chargement thermique des pieux entraîne des contraintes et des déformations qui influencent la stabilité et les tassements de la structure.

Une barre en béton, libre de se déformer se dilate sous l'effet d'une augmentation de sa température ou se contracte en cas de refroidissement. Les pieux de fondation ne sont pas entièrement libres de se déplacer insérés dans le sol de construction (efforts de frottement le long des pieux) les extrémités sont prises entre la présence du bâtiment à la tête du pieu, et la couche rigide située à la base (effet de pointe). Une partie ou la totalité de la déformation thermique est empêchée.

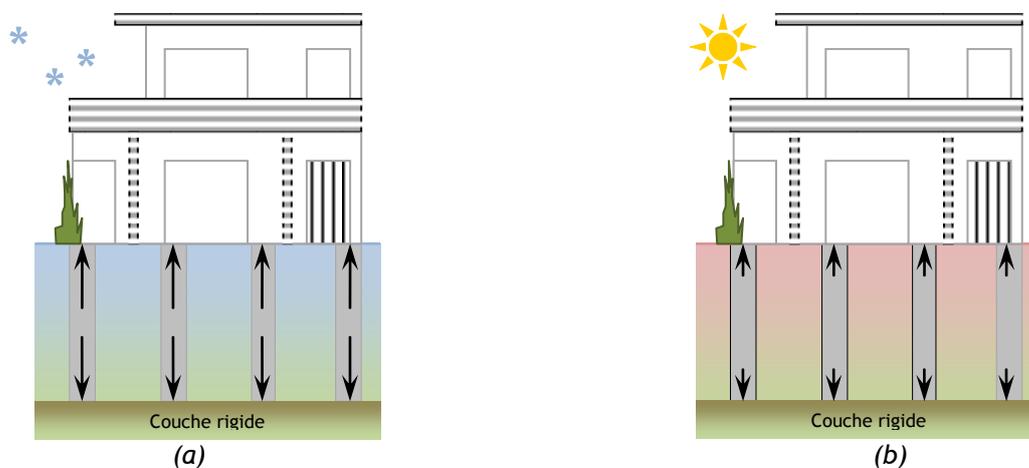


Figure 4 : (a) Lorsque la température des pieux augmente, ceux-ci tendent à se dilater, augmentant ainsi les efforts de compression ; (b) la température des pieux diminue, ceux-ci tendent à se contracter, les efforts de compression diminuent

Les phénomènes de contraction ou de dilatation sont donc limités par la présence du sol et du bâtiment (figure 4), générant des efforts supplémentaires dans le pieu : à la dilatation, il y a création d'efforts de compression supplémentaires, alors qu'à la contraction, les efforts de compression diminuent et des efforts de traction peuvent apparaître. Le béton risque de fissurer, des armatures supplémentaires peuvent être nécessaires. Les surcharges sont évaluées par :

$$Q_{th} = E_{pieu} (\tau - 1) \alpha_T \quad [kN]$$

Avec $\tau = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_l}$, taux de liberté de la structure et α_T , coefficient de dilatation thermique.

ε_g est la déformation gênée fraction de la déformation libre ε_l que provoquerait le même écart de température.

2.2 - Problématiques

Les pieux sont soumis à des cycles thermiques par le soutirage de chaleur puis de la régénération du sol. Ces cycles génèrent des variations de température qui créent des surcharges thermomécaniques, le pieu cherchant à se dilater ou à se contracter. La couche superficielle non consolidée a tendance à se tasser sous le poids du bâtiment : le sol s'enfonce par rapport au pieu qui lui est encasté en pied dans une couche rigide. Le déplacement génère du frottement au contact sol/pieu. Dans le sol, les cycles de déformation du pieu (contraction et dilatation)

provoquent de la fatigue, et risquent de réduire la capacité portante du sol en réduisant la performance du frottement sol/pieu.

Les pieux géothermiques font face à deux problématiques qui vont impacter la pérennité de la portance du pieu, les déformations en tête et entraîner des modifications de l'effort normal (figure 5).

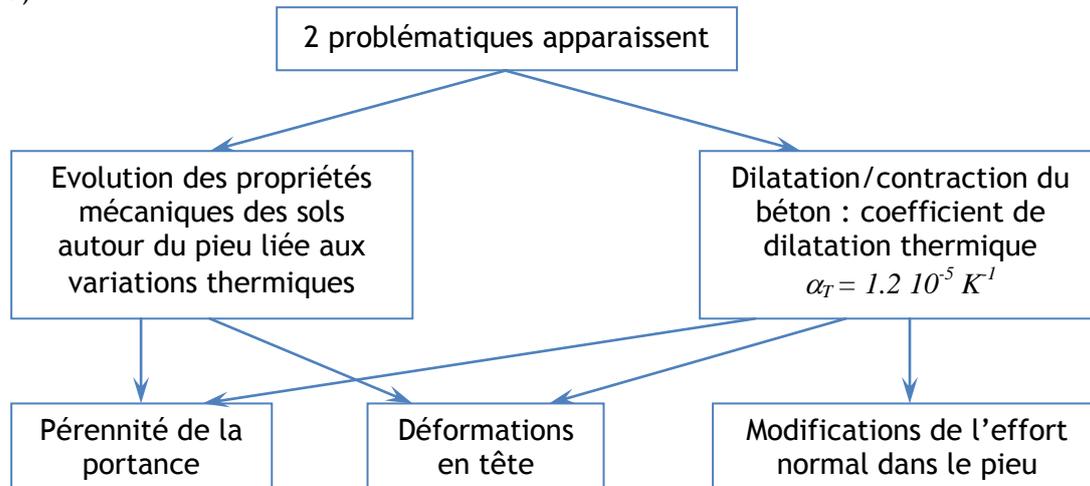


Figure 5 : Problématiques et conséquences dans les pieux géothermiques

3 – Mise en œuvre

Il existe plusieurs techniques de mise en œuvre des pieux géothermiques, sont développés ici quelques techniques de pieux forés. Les techniques ne se restreignent pas aux pieux forés (développés ci-après) on trouve aussi les pieux battus ou les pieux vissés, cependant en France cette technique est majoritairement utilisée.

Pieux forés boue

La mise en œuvre du forage est exécutée par une tarière ou une bêche sous la protection d'une boue de forage bentonitique ou avec polymères (figure 6). C'est une technique qui permet de maintenir les parois de forage sous pression pour que ces dernières ne s'affaissent pas.

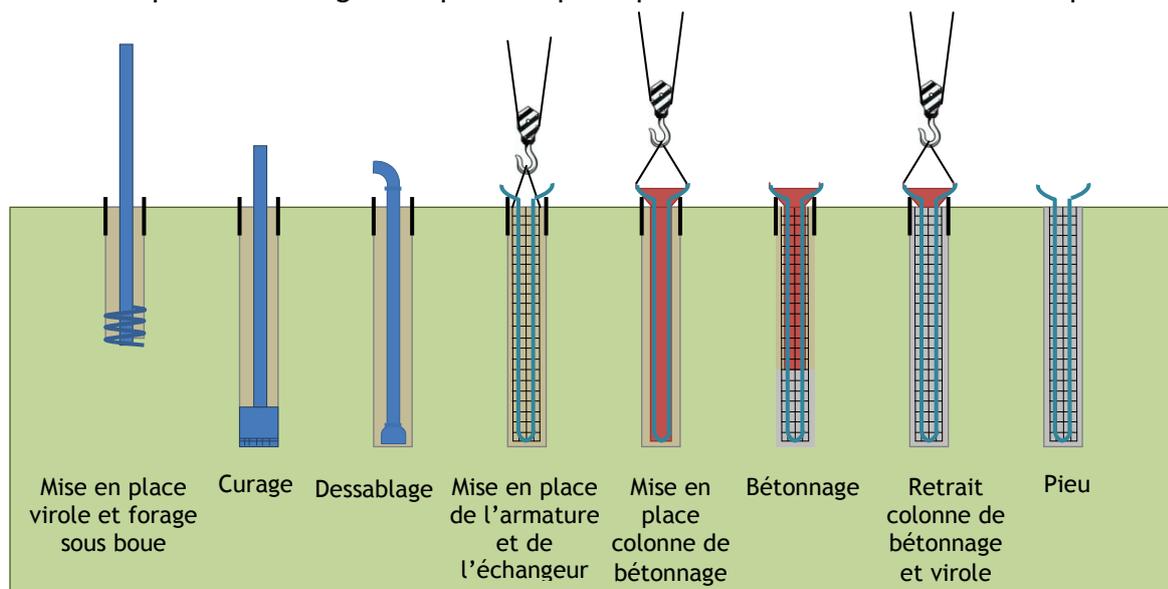


Figure 6: Schématisation des différentes phases de la mise en œuvre des pieux forés boue

Cette technique nécessite l'installation d'une centrale à boue, puis la récupération de la boue pour recyclage.

Pieux forés tubés

Les performances au niveau du frottement latéral sont plus faibles, et le contact sol/pieu est moins intime. Le contact sera moins bon thermiquement.

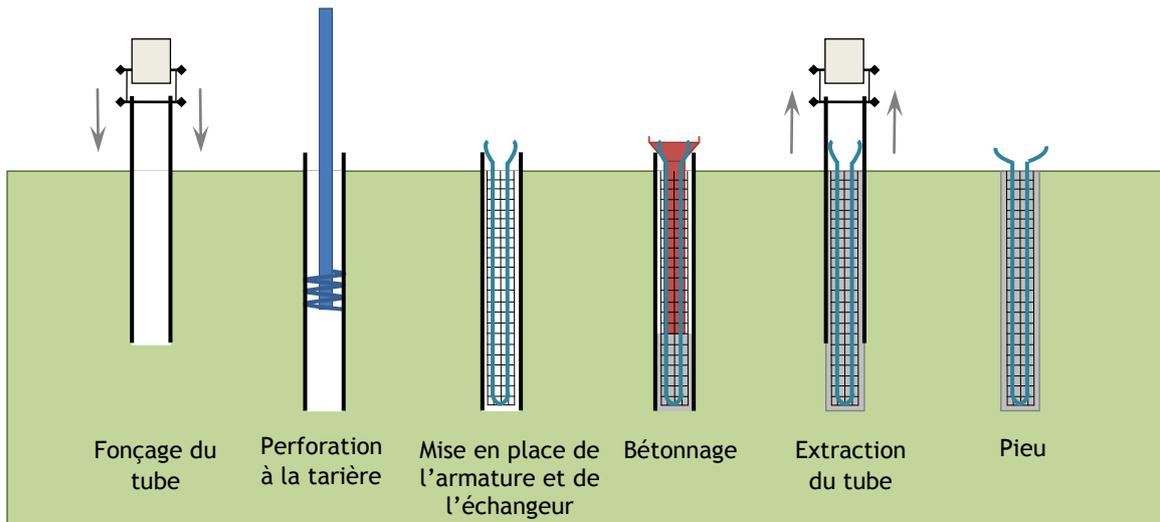


Figure 7 : Schématisation des différentes phases de la mise en œuvre des pieux forés tubés

Pieux forés à tarière creuse.

La cage d'armature est mise en place dans le béton frais. Le béton doit répondre à des exigences en matière de propriétés rhéologiques.

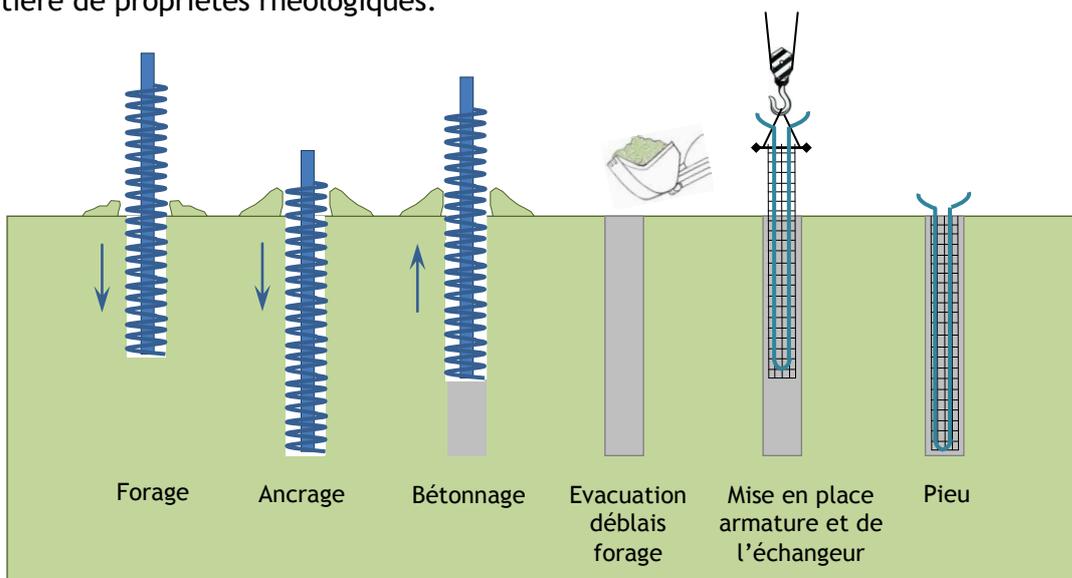


Figure 8 : Schématisation des différentes phases de la mise en œuvre des pieux forés à tarière creuse

4 – Exploitation des pieux géothermiques

Les échanges thermiques entre les pieux et le bâtiment se font à l'aide d'une pompe à chaleur (figure 9). En période froide, du sol est extraite la température permettant de chauffer le bâtiment. En période chaude, la température du bâtiment est réinjectée dans le sol. Ainsi le bilan global au niveau du sol est neutre

Les calories transportées par le fluide caloporteur du sol vers la pompe à chaleur sont transférées par cette dernière au fluide de chauffage (généralement de l'eau chaude). Le fluide caloporteur circule en circuit fermé entre les pieux et un collecteur relié à la pompe à chaleur. L'eau chaude peut être utilisée pour les systèmes de chauffage à basse température (du type plancher chauffant) ou pour les systèmes sanitaires.

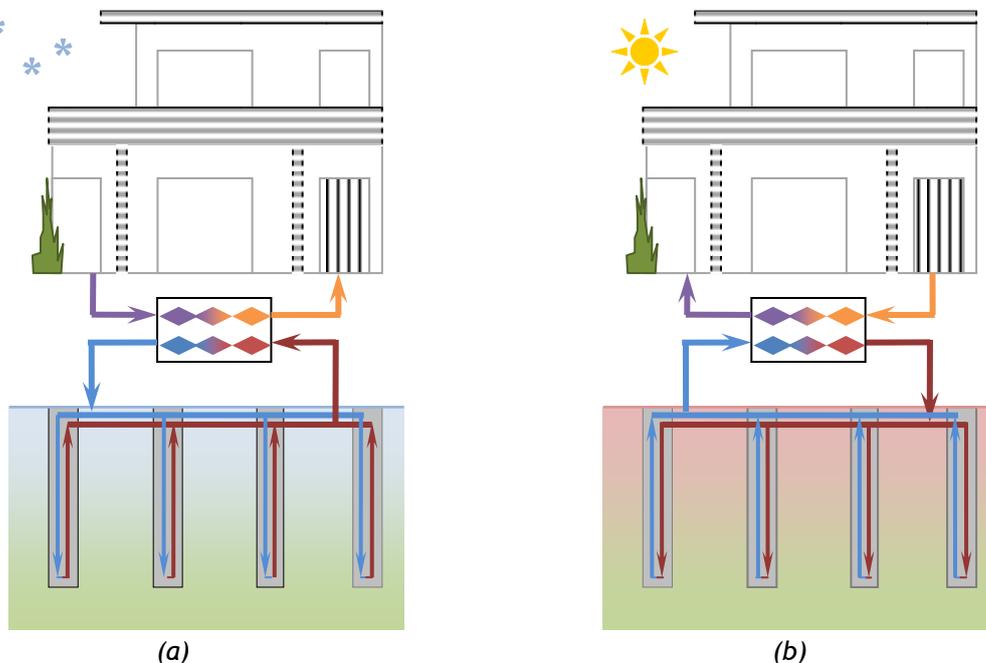


Figure 9 : (a) période froide : chauffage du bâtiment, (b) période chaude : rafraîchissement du bâtiment

La pompe à chaleur permet une énergie dépensée d'environ le quart de l'énergie produite. Bien évidemment l'utilisation des pieux géothermiques est recommandée pour des bâtiments correctement isolés et exclusivement pour de nouvelles constructions (il n'est pas possible d'équiper des pieux existants) et leur exploitation est destinée aux bâtiments nécessitant la mise en place de pieux pour assurer leur stabilité. L'utilisation des sources de chaleur et de froid à moindre coût est possible cependant il ne faut pas négliger l'importance de l'isolation des bâtiments. En France où les températures restent tempérées les calories ou frigories les moins chères sont toujours celles non produites.

Le fonctionnement des pieux énergétiques est basé sur la température relativement constante du sous-sol. En France, la température du sous-sol étant supérieure à la température moyenne de l'air en hiver et inférieure à celle-ci en été, les pieux ont une double utilisation de chauffage en hiver et de refroidissement en été. Les pieux énergétiques exploitent la capacité de stockage d'énergie du sol ; une bonne gestion de ce stock (il est épuisable !) permet de limiter la dépendance aux énergies non renouvelables (la quantité d'énergie produite est environ 3 fois supérieure à la quantité d'énergie électrique). La production d'énergie via l'exploitation de la géothermie est donc respectueuse de l'environnement.

Les pieux géothermiques présentent comme seuls risques de pollution ceux liés à la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur ainsi qu'à la fabrication et au transport des matériaux. A noter que les coûts environnementaux de transport et de fabrication sont comparables à ceux des autres systèmes de chauffage fonctionnant à partir des énergies fossiles ou du nucléaire, et qu'une pompe à chaleur permet de réduire les rejets de CO₂ par rapport à un chauffage aux énergies fossiles (par exemple, on peut estimer une réduction d'environ 50% par rapport au mazout).

Références :

[1]: <https://www.espazium.ch/traces/article/pieux-energetiques>

[a]: Les pieux énergétiques : étude de faisabilité. Ing D. Bourgeois, ECAM - Bruxelles

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>