

GÉOSTRUCTURE ÉNERGÉTIQUE INNOVANTE - LE MICROPIEU ÉNERGÉTIQUE DÉBOUCHANT

INNOVATING ENERGY GEOSTRUCTURE - THE OPEN ENERGY MICROPILE

STÉPHANE RENDU, ingénieur génie civil, Sarl In Situ EnR, Aix en Provence France

RÉSUMÉ – Le *micropieu énergétique débouchant* permet le passage d'une sonde géothermique à l'intérieur de l'armature tubulaire du micropieu ouverte à sa base. La sonde géothermique peut être ainsi descendue à la profondeur nécessaire aux besoins calorifiques de la structure.

ABSTRACT – The *open energy micropile* enables a geothermal probe to be put through the tubular frame of the micro pile and then emerge from the base of it. The geothermal probe can thus be lowered to the required depth and so meets the calorific needs of the structure.

Introduction

Dans la recherche de source d'énergie renouvelable propre, il est aussi possible d'utiliser tout type de fondation et ouvrage enterrés pour extraire du sous-sol des calories pouvant être utilisées aux fins de chauffage d'une structure quelqu'elle soit; bâtiment collectif, individuel ou industriel, chaussées et trottoirs.

Tout ouvrage nécessite un type de fondation adapté aux charges qu'il occasionne sur le sol; semelles filantes, radiers, parois moulés, puits, pieux ou encore micropieux.

L'ensemble de ces infrastructures peut alors jouer le rôle de capteurs de calories et participer ainsi à un échange thermique sol-structure.

Ces différents capteurs sont dimensionnés en tenant compte des descentes de charges appliquées au sol et des contraintes géotechniques du site concerné.

Les possibilités d'extraction géothermiques sont alors limitées par la surface et la profondeur des éléments constitutifs des fondations.

Le *micropieu géothermique débouchant* permet de s'affranchir de cette limite infrastructurelle et ainsi pouvoir capter la puissance nécessaire au fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC) à la profondeur souhaitée.

Les conditions de réalisation d'un système de fondation par micropieus géothermiques débouchants sont décrites dans une première partie qui présente les aspects géotechniques, géothermiques et la concomittance entre micropieus et forages géothermiques.

Le processus de réalisation, l'enchaînement des études et les aspects techniques, sont décrit dans une deuxième partie.

La dernière partie fait état d'un retour d'expérience constituant sur une période de six années, un essai de chargement en place couplant charges structurelles et thermiques sur micropieus géothermiques débouchants.

La conclusion permettra de résumer les avantages apportés par ce type de géostructure énergétique.

1. Éléments théoriques de faisabilité

1.1. Aspects géotechniques des fondations sur micropieux

La faisabilité de ce type de géostructure repose entièrement sur un principe géotechnique qui est qu'un micropieu (diamètre ≤ 250 mm) transmet la charge qui lui est appliquée uniquement par frottement latéral sur la surface d'ancrage caractérisée par l'interface coulis-sol . La résistance en pointe n'est pas prise en compte dans les calculs. De ce fait, rien n'empêche de poursuivre le forage à partir de la base du micropieu pour descendre à la profondeur la plus adaptée au bon fonctionnement du réseau de chaleur.

Pour que la technique soit applicable au projet, il est nécessaire que suite aux investigations géotechniques (mission G2 AVP) menées, la solution de micropieux soit retenue comme système de fondation.

Dans le cadre d'une mission géotechnique complémentaire de type G2 PRO, le diamètre et la profondeur de chacun des micropieux nécessaires au projet seront précisés. Ces informations seront utilisées par la suite pour dimensionner l'ouvrage de géostructure.

Le même type d'étude peut se faire aussi dans le cadre d'une reprise en sous-œuvre, le micropieu géothermique débouchant pouvant là aussi être utilisé.

Les sondages réalisés lors de ces différentes investigations géotechniques (carottage, pressiomètre, pénétromètre) donnent aussi des informations utiles au bureau d'étude thermique sur la nature et la conductivité des sols sous-jacents à la structure.

Si la décision de réaliser ce type de fondation géothermique est prise en début de projet, les sondages de sols pourront être plus spécifiques en cherchant notamment la nature des formations en profondeur au-delà de la zone d'ancrage des micropieux avec une étude hydrogéologique précisant la présence ou non d'une nappe et si oui les vitesses d'écoulement.

Pour un projet tel qu'un bâtiment collectif ou industriel, il sera utile de réaliser un test de réponse thermique (TRT), permettant de connaître précisément, la résistance thermique du forage, les différentes températures et conductivités thermiques λ des sols rencontrés, valeurs indispensables pour déterminer le linéaire total de forages à réaliser. La capacité thermique du milieu, plus importante avec la profondeur et la présence d'eau est un gage de durabilité du système.

1.2 Aspects thermiques des forages géothermiques très basse énergie

Le bureau d'étude thermique définit la puissance des pompes à chaleur nécessaire au chauffage d'un bâtiment. Il est également possible de prévoir le rafraîchissement du bâtiment, ce qui permet la recharge calorifique du sol en été.

De manière classique un forage géothermique est équipé de deux doubles sondes en polyéthylène haute densité (PEHD 100) de diamètre 25 ou 32 mm. Ces sondes sont remplies d'eau glycolée qui va circuler en circuit fermé, du forage à la pompe à chaleur, sans être mélangée au liquide frigogène propre à la PAC.

Ce fluide caloporteur va récupérer des calories lors de son cheminement dans le forage. Lors de son passage au niveau de l'évaporateur de la PAC, le fluide va perdre ses calories puis reprendre un cycle avec des températures au départ pouvant être négatives (0 à -3° environ). La température moyenne du sol vers 50 m de profondeur est de 14°C avec un gradient de température de 1°C tout les 33 m.

Le linéaire total est fonction du rendement thermique des différents sols rencontrés. Par exemple, pour une PAC de 10 Kwatt et un rendement thermique moyen de 50 watts par mètre linéaire, il faudra réaliser deux forages de 100 m chacun ou quatre de 50 m.

1.3 Concomitance entre micropieux et forages géothermiques

Les deux techniques nécessitent la réalisation de forages dans des diamètres variant de 90 à 250 mm pour les micropieux et 140 ou 150 mm pour la géothermie.

Les micropieux sont descendus de 8 à 20 m dans les cas les plus courant et les forages géothermiques de 50 à 100 m.

L'armature tubulaire d'un micropieu est injectée d'un coulis de ciment dosé à 1200 kg/m³ pour assurer la portance latérale coulis-sol et les sondes géothermiques sont elles injectées d'un coulis de ciment caloporeur remplissant l'annulaire et assurant ainsi la conductivité thermique entre le sol et le fluide caloporeur.

Le micropieu énergétique débouchant a comme caractéristiques principales: un diamètre de foration de 140 à 160 mm, une profondeur pouvant aller de 25 à 50 m et plus si nécessaire, une armature tubulaire descendue entre 8 et 20 m injectée d'un coulis de ciment dosé à 1200 kg/m³, deux doubles sondes en PEHD 100 de 25 ou 32 mm descendues en fond de forage et injectées d'un coulis caloporeur.

L'étude géotechnique et le dimensionnement de fondation qui en découle, sont ensuite corrélés à l'étude thermique afin d'ajuster le linéaire de forage géothermique nécessaire au chauffage de la structure au linéaire disponible des micropieux utiles à la supporter.

2. Enchaînement des études menant à une solution de micropieux géothermiques débouchants

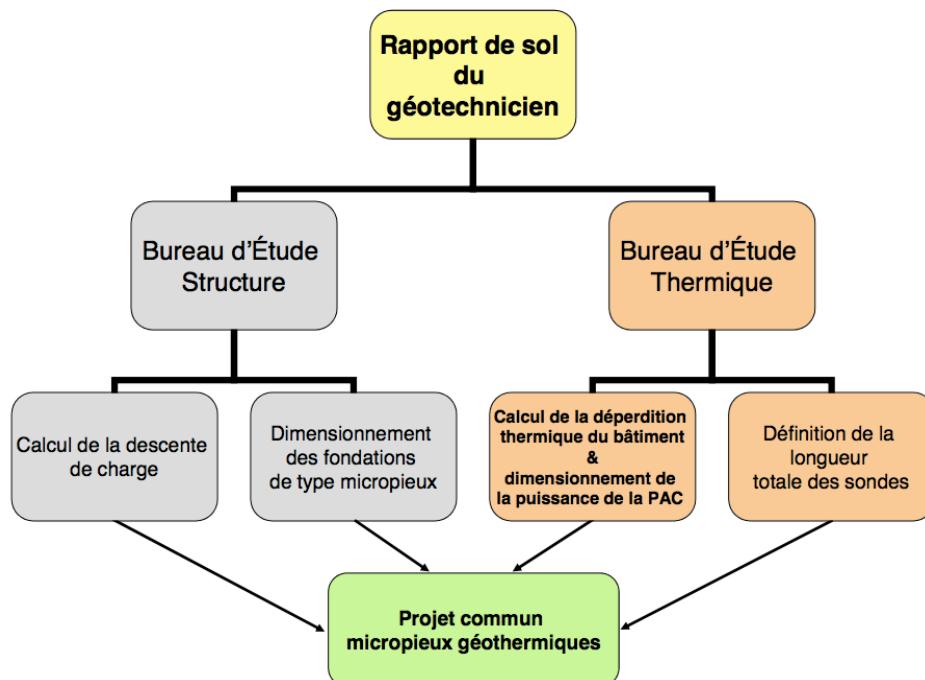


Figure 1. Enchaînement des études (source : auteur).

2.1 Étude géotechnique

Une étude de sol adaptée devra donner d'une part les caractéristiques mécaniques des sols de surface correspondant à la zone d'ancrage des micropieux et d'autre part les caractéristiques thermiques des sols de la surface jusqu'à une profondeur de l'ordre de 30 à 50 m ou plus. Ainsi un forage destructif profond pourra être réalisé donnant la nature des

horizons traversés et la présence ou non d'une nappe. Il est possible de profiter de ce dernier forage pour effectuer un test de réponse thermique.

Le bureau d'étude géotechnique fait alors un prédimensionnement des micropieux donnant les longueurs mortes à prendre en compte et les caractéristiques de la zone d'ancrage, à savoir la valeur du frottement latéral unitaire par horizon concerné et la description de la nature du sol avec teneur en eau in situ.

2.2 Étude structure

Le bureau d'étude structure définit le nombre de micropieux, leur diamètre et la longueur de chacun en fonction de la descente de charge qui leur est appliquée et des éléments apportés par le géotechnicien.

2.3 Étude thermique

Le bureau d'étude thermique détermine les besoins en chauffage et rafraîchissement du bâtiment projeté (ou réhabilité, rénové) en fonction de son implantation géographique, son volume, le type d'isolation prévue et sa destination (individuel, industrielle, publique...).

Il précise ensuite la puissance de la PAC (ou des PAC) nécessaire à une solution de chauffage et rafraîchissement par géothermie verticale. Enfin en fonction des puissances spécifiques des horizons de sols étudiés, il calcule le linéaire de forage géothermique nécessaire au bon fonctionnement de la PAC.

En cas d'insuffisance d'information concernant la conductivité des sols, le BET thermique pourra se référer aux valeurs données ci-dessous (Pahud, 2002).

Type de terrain	Puissance spécifique extraite pour 1800 h/an	Puissance spécifique extraite pour 2400 h/an
Valeurs générales indicatives		
Sous-sol pauvres (sédiments secs)	25 W/m	20 W/m
Sous-sol normalement rocheux et sédiments saturés en eau	60 W/m	50 W/m
Roches consolidées à conductivité thermique élevée	84 W/m	70 W/m
Roches spécifiques		
Graviers et sables secs	≤25 W/m	≤20 W/m
Graviers et sables saturés en eau	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Argile humide	35 à 50 W/m	30 à 40 W/m
Calcaire massif	55 à 70 W/m	45 à 60 W/m
Grès	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Granite	65 à 85 W/m	55 à 70 W/m
Basalte	40 à 65 W/m	35 à 55 W/m
Gneiss	70 à 85 W/m	60 à 70 W/m

Source : Docteur Pahud du Département Constructions et Territoire du Laboratoire d'Energie, d'Ecologie et d'Economie de l'Ecole Universitaire Professionnelle de Suisse italienne.

Figure 2. Classement des sols par puissance calorifique disponible.

Cette étude permet de choisir la zone de captage calorifique en fonction de la puissance spécifique pouvant être extraite selon la couche considérée.

En effet, si l'étude de sol fait état d'un sol pauvre, de type graveleux, avec une puissance spécifique de 20 W/m sur une vingtaine de mètres et surmontant un calcaire massif à 50

W/m, on descendra les sondes géothermiques au sein des calcaires même si le positionnement de l'extrémité basse des micropieux se situe dans les matériaux graveleux.

2.4 Solution d'une géostructure de type micropieux géothermiques débouchants

La solution peut être retenue lorsque le linéaire total de forages géothermiques est supérieur au linéaire disponible dans l'espace tubulaire des micropieux.

Certains forages pour micropieux seront alors descendus à une cote permettant d'une part d'obtenir de meilleurs rendements calorifiques et d'autre part d'avoir le linéaire requis pour les sondes géothermiques comme décrit dans les schémas ci-dessous.

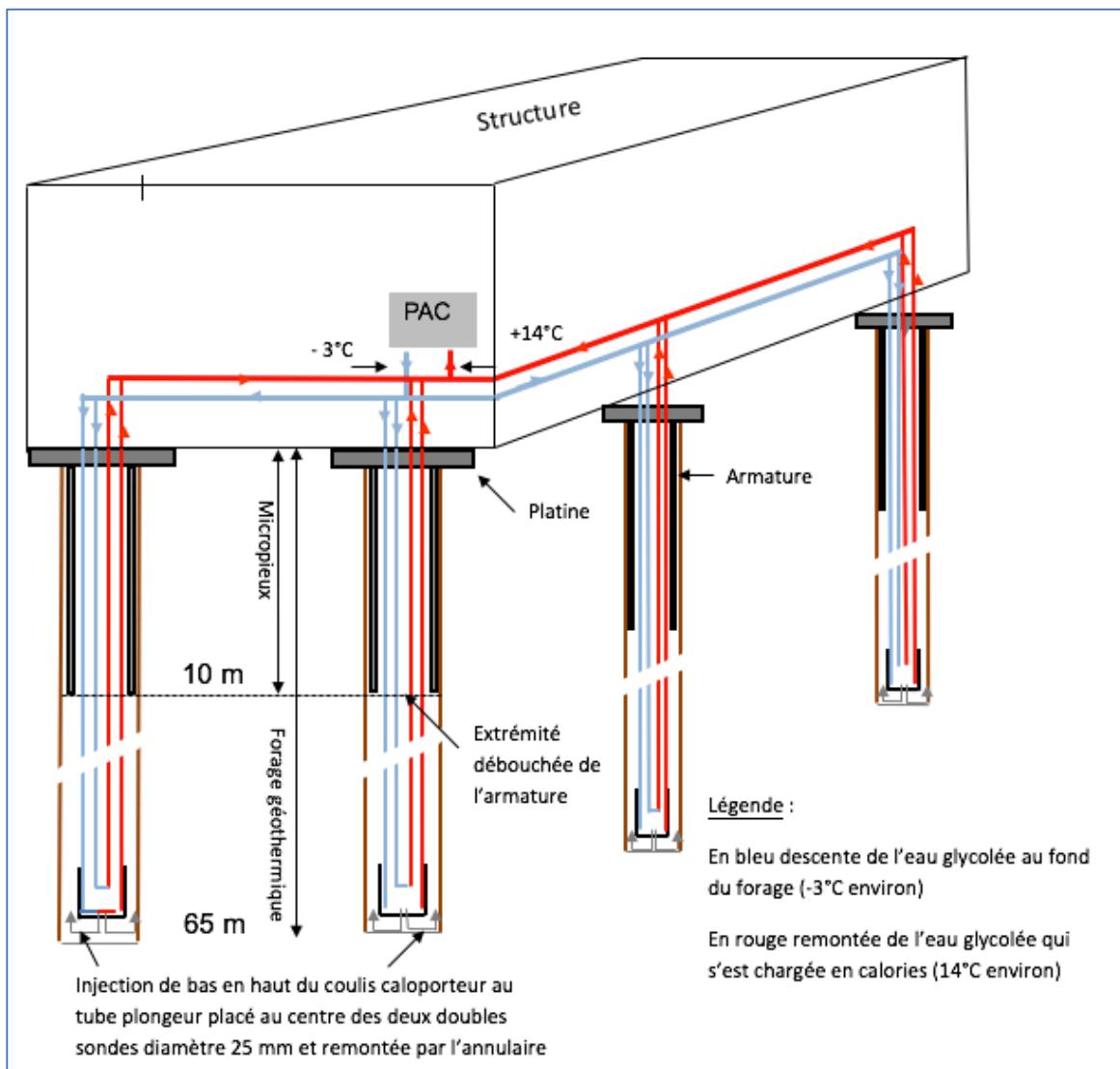


Figure 3. Champ de micropieux énergétiques débouchants (source : auteur)

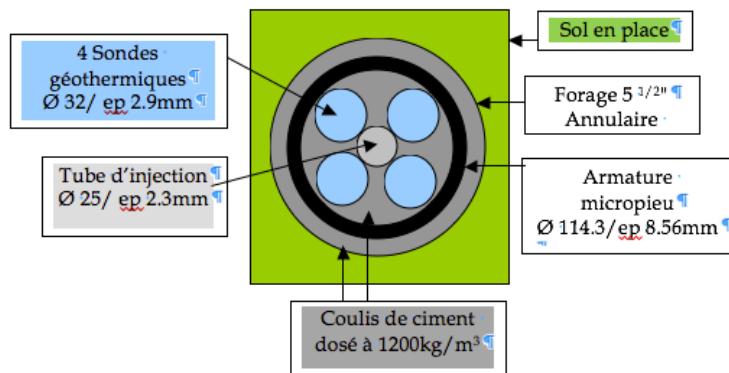


Figure 4. Coupe d'un micropieu géothermique débouchant (source : auteur).

3. Retour d'expérience sur un cas réalisé

En 2012 commence la réhabilitation et la rénovation d'une batisse du XVIII siècle à 1000 mètres d'altitude dans les Hautes Alpes.

Des désordres en superstructures nécessitent une reprise en sous-œuvre partielle sur micropieus.

Par ailleurs dans le cadre de la réglementation thermique de 2012 il est prévu des planchers chauffants sur PAC géothermique mais le manque de terrain sur le pourtour de la maison pour y placer les forages géothermiques pose un problème d'implantation. L'enchaînement résumé des études est le suivant.

BE géotechnique : réalisation d'essais au pénétromètre dynamique et d'un forage destructif avec enregistrement des paramètres de forage descendu à 68 m. Le forage sera ensuite équipé de sondes géothermiques. Le rapport de sol décrit des marnes noires avec alternance de schistes ardoisiers à partir de 4 m. Dans ces formations, le frottement latéral unitaire $q_s = 0,3 \text{ Mpa}$. Par ailleurs il est relevé une nappe de versant à 40 m.

BE structure: descente de charge par micropieu, 260 KN. Entraxe des 5 micropieus prévus, 2 m. Longueur d'ancrage en diamètre 140 mm, 5,50 m, soit 9,50 m arrondi à 10 m pour tenir compte de la charge thermique négligeable avec $\Delta T_{\max} = 6^\circ\text{C}$ (Laloui et Di Donna, 2014).

BE thermique : la température extérieure de base est de -17°C . Pour une surface de plancher chauffant de 140 m^2 avec une température d'ambiance de 20°C , la puissance calorifique de la PAC retenue est de 13054 W. Avec un COP de 5,87 la puissance calorifique à soutirer du sol est de 10832W. Après consultation du tableau de la figure 2 la valeur de 60 W/m est retenue pour une utilisation de 1800 h/an (résidence secondaire). Le linéaire de forages géothermiques est alors de 180 m, soit trois forages à 60-65 m.

BE maîtrise d'œuvre : deux micropieus sur cinq sont équipés de sondes géothermiques débouchantes afin de ménager une distance de 8 m entre les deux cylindres de prélèvement calorifique que constituent des forages géothermiques.

Les armatures en tube épais 114 mm ext, ép 7 mm sont descendues à 10 m ; les sondes géothermiques traversant les tubes descendent elles à 65 m.

Les trois micropieus restant sont équipés de tubes de 73 mm ext, ép 5 mm et descendus aussi à 10 m.

Le troisième forage géothermique à 65 m est celui réalisé lors de la reconnaissance de sol à proximité de la batisse dans un espace réduit mais permettant de se tenir à 10 m du micropieu géothermique le plus proche.



Figure 5. Bâtisse avant travaux (photo auteur).



Figure 6. Descente des sondes dans l'armature (photo auteur).



Figure 7. Sondes et tuyau d'injection dans micropieus (photo auteur).



Figure 8. Sortie de la sonde en extrémité de la longrine de liaison en sous-œuvre (photo auteur).



Figure 9. Test de mise en charge avant injection (photo auteur).



Figure 10. Bâtisse après travaux (photo auteur).

Procédure de réalisation : un forage destructif avec enregistrement de paramètre en $\varnothing 150$ mm est descendu à 65 m. L'armature tubulaire du micropieus est suspendue à 10 m, puis les deux sondes sont descendues à l'intérieur de l'armature pour déboucher au fond du forage.

L'injection des coulis est ensuite réalisée de bas en haut au moyen d'un tube d'injection retiré au fur et à mesure du remplissage avec un coulis caloporeur jusqu'à la base du micropieus puis un coulis porteur jusqu'en tête de forage. La réhabilitation de ce bâtiment, réalisée en 2012, constitue un retour d'expérience en 2018 sur une reprise en sous-œuvre par micropieus couplée au chauffage par géothermie verticale au sein des micropieus.

L'installation a subi six cycles de chargement-déchargement thermiques au cours desquels la température moyenne des armatures des micropieus au niveau de la couche

d'ancrage (4 m), est passé de 6°C en plein hivers à 12°C l'été lorsque la circulation du fluide caloporeur est à l'arrêt.

Les jauge de déplacement placées sur certaines fissures antérieures à la reprise en sous-œuvre montre que la structure est stabilisée. Les micropieux n'ont donc pas accusé de déplacements ou déformations malgré le fait qu'ils soient débouchants et qu'ils subissent des variations de température dans leur espace tubulaire.

D'autre part, le chauffage du bâtiment est assuré malgré des hivers rigoureux, températures extérieures relevées à -17°C, avec une température intérieure de 20°C.

4. Conclusion

Cette technique de micropieux géothermiques débouchants permet donc au sein d'un même forage de porter la structure en partie supérieure de celui-ci par l'intermédiaire de micropieux et de chauffer cette structure par un prélèvement de calories au moyen de sondes descendues en partie inférieure du même forage.

Plusieurs avantages sont à relever lors de l'utilisation de la technique.

Le premier comme dans le cas décrit ci-dessus, est la possibilité de faire de la géothermie verticale même en l'absence de terrain autour du bâtiment, le corollaire étant le fait qu'il n'y a pas l'encombrement extérieur nécessaire à la géothermie verticale traditionnelle.

La simultanéité des opérations fondation et chauffage présente un intérêt économique.

Techniquement, les sondes géothermiques se retrouvent chemisées par les tubes de micropieux, ce qui les protège durablement des agents agressifs de surface, engins mécaniques notamment.

Contrairement aux pieux géothermiques et tout autre système de géostructure, les sondes géothermiques descendues au travers des armatures de micropieux débouchants ne sont pas tributaires des profondeurs et surfaces limitées des pieux, voiles, voussoirs de tunnels et par conséquent pas tributaires également des puissances calorifiques des sols d'assise et d'encastrement de ceux-ci. Le principal intérêt de la technique est de pouvoir choisir les sols les plus aptes à fournir des calories et cela d'une manière pérenne.

Par ailleurs les contrôles de dimensionnement des micropieux se font par essais de traction parce qu'ils "frottent" latéralement, rien ne s'oppose alors à ce qu'ils soient débouchants. Ainsi théoriquement dans tout projet de construction sur micropieux l'on pourrait étudier la faisabilité d'y adjoindre une solution de chauffage renouvelable comme la géothermie verticale.

5. Références bibliographiques

- CEREMA. (2014). Structures géothermiques. CFMS.
- CFMS. (2017). Guide sur les Géostuctures Énergétiques.
- Fromentin et al., (1997). Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs.
- IFSTTAR. (2014). Propositions de justification des pieux énergétiques. CFMS.
- Laloui L., Di Donna A. (2014). Géostuctures énergétiques. Hermes Science Publications.
- Pahud D., (2002). Énergie géothermique et stockage de chaleur. Publication de l'Ecole Universitaire Professionnelle de Suisse italienne, p.48.
- Pahud D., (2011). Pieux échangeurs: conception et règles de pré-dimensionnement.
- Pahud D., Fromentin A. (1998). Pieux échangeurs: Etude préliminaire de faisabilité technique et économique.
- Rendu S. (2012). Micropieux Géothermiques Débouchants (Brevet N°1000156497)