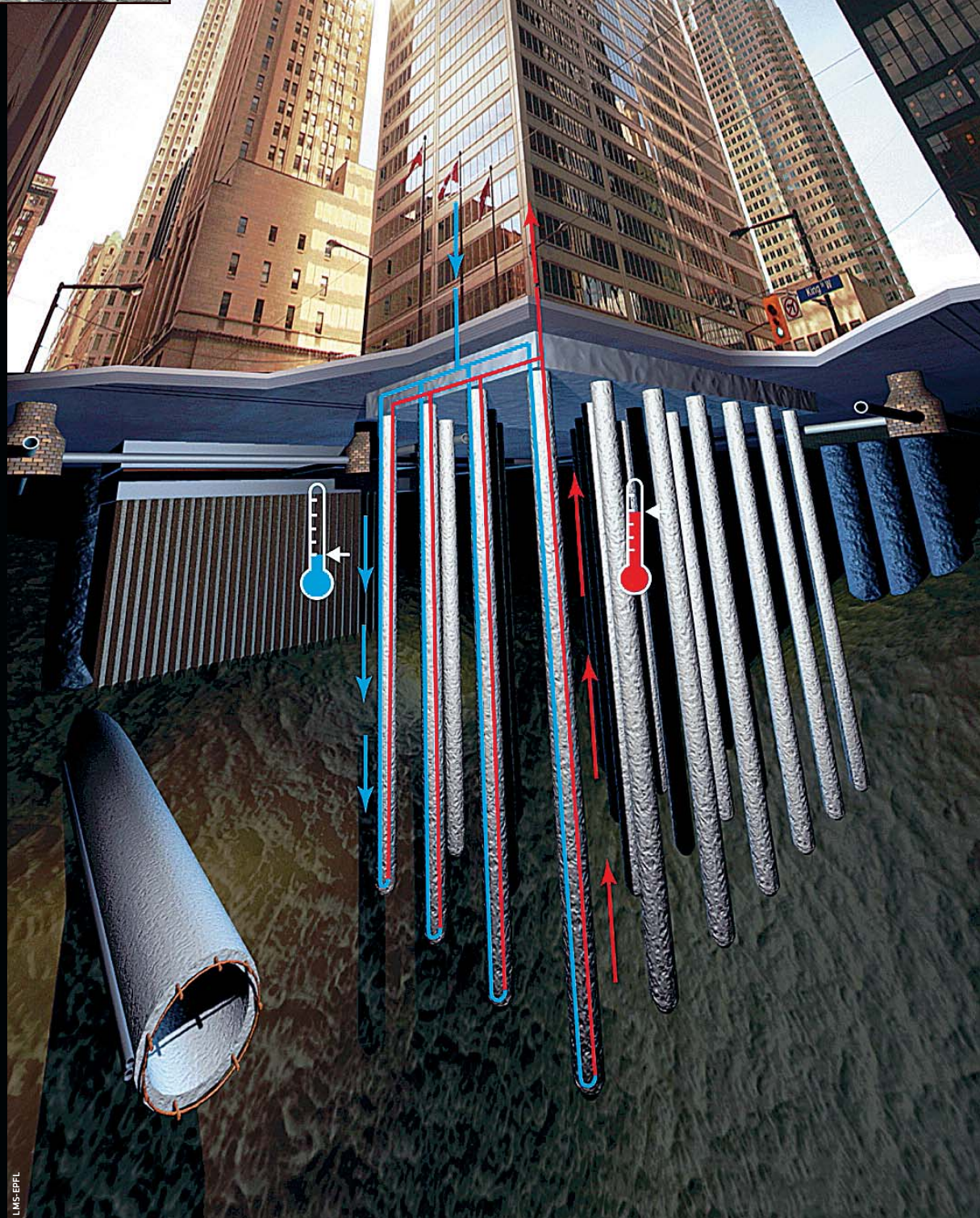




PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Echange de chaleur à faible profondeur

■ Même à faible profondeur, en France, la température du sous-sol est quasi constante (entre dix et quinze degrés Celsius) à dix mètres de profondeur. Fichés dans le sous-sol jusqu'à quelques dizaines de mètres, les pieux géothermiques sont en position idéale pour en extraire les calories l'hiver ou les y injecter l'été afin de chauffer ou rafraîchir le bâtiment. L'échange de chaleur s'effectue à travers la paroi en béton armé du pieu via un fluide caloporteur (eau pure ou additionnée de glycol) qui circule dans un réseau de tubes flexibles fixés à la cage d'armatures de la fondation. Ceux-ci effectuent des allers-retours le long du pieu pour maximiser la surface d'échange (voir photo ci-dessus). En tête de chaque pieu, les réseaux convergent vers une pompe à chaleur qui va transférer cette énergie vers l'intérieur du bâtiment. De nombreux paramètres optimisent la qualité d'un sol vis-à-vis des échanges thermiques : principalement sa bonne conductivité thermique et la présence d'une nappe d'eau active à faible profondeur, qui permet de régénérer rapidement son stock de calories. Côté mise en œuvre, deux phases exigent un soin particulier : le coulage du béton, fait à vitesse contrôlée pour ne pas abîmer les tubes ; et le recépage (étêtage) du pieu après bétonnage, pratiqué avec précision pour ne pas les couper.



GÉOTECHNIQUE

Quand les fondations captent la chaleur du sol

En extrayant la chaleur ou la fraîcheur du sous-sol, les fondations profondes peuvent être utilisées pour chauffer ou rafraîchir les bâtiments. A l'interface de la géotechnique et de la géothermie, cette technique encore très peu pratiquée en France pourrait se développer rapidement.

Lorsque, pour soutenir un bâtiment, la nature du sol impose la réalisation de fondations profondes (pieux, parois moulées... voir encadré page 34), pourquoi ne pas profiter de leur présence dans le sous-sol pour en extraire la chaleur en hiver, ou la fraîcheur en été? Autrement dit, pourquoi ne pas transformer une contrainte structurelle en un atout énergétique? L'opportunité est d'autant plus séduisante que l'intégration des équipements géothermiques dans les fondations ne modifie qu'à la marge leur mode de réalisation, n'induisant généralement que de faibles surcoûts, rapidement compensés par les économies d'énergie qu'elle génère (voir encadré p. 35). «S'il est bien étudié et intégré au projet suffisamment en amont, le système devient rentable pour le maître d'ouvrage», assure Jean-Baptiste Bernard, gérant d'Ecome Géothermie pro-

fessionnelle, un bureau d'études spécialisé. D'autant que la plupart des terrains semblent pouvoir convenir à ce nouvel usage (voir encadré page ci-contre).

Mille réalisations en Europe, mais moins de dix en France

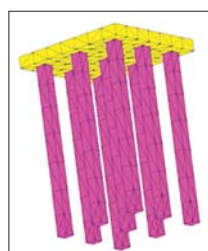
Selon Lyesse Laloui, directeur du laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole polytechnique de Lausanne, spécialiste international de ce type de structure (voir texte ci-dessous), l'Europe compte environ mille réalisations. L'Autriche étant en tête d'un quatuor qui comprend aussi la Suisse, l'Allemagne et l'Angleterre. Mais, en France, les réalisations se comptent sur les doigts: la Cité du design de Saint-Etienne, inaugurée en 2009, est l'exemple le plus ancien; un gymnase à Chateauroux, le plus récent (inauguration l'été dernier). Alors comment expliquer ce

retard? D'une part, «le procédé, qui mêle thématiques géotechnique, hydrogéologique et thermique est à la croisée de métiers qui sont souvent déconnectés dans les bureaux d'ingénierie, ce qui ne facilite pas son approche», analyse Jean-François Heitz, directeur «Infrastructures» d'Antéa. D'autre part, «pour la géotechnique, la conception des géostructures énergétiques a, jusqu'ici, été uniquement basée sur l'expérience et des considérations empiriques, explique Lyesse Laloui. La compréhension de leur comportement thermomécanique est de ce fait encore limitée». Les changements de température peuvent déformer les pieux ou y créer des surcontraintes, modifier les propriétés du sol ainsi que l'interface sol/structure. Ces évolutions de comportement font l'objet de nombreux projets de recherches (voir texte ci-dessous). (●●●)

RECHERCHE Lever les verrous qui bloquent cette technique

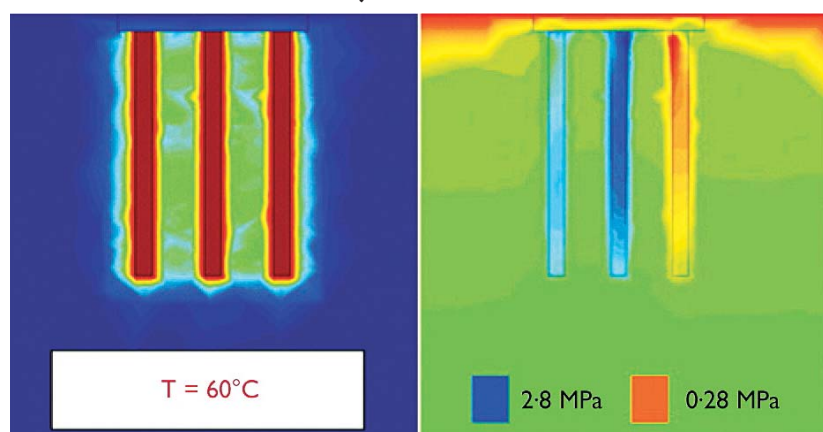
Pour que les fondations énergétiques puissent se diffuser largement, les scientifiques ont un rôle majeur à jouer. Sous l'égide de l'Agence nationale pour la recherche (ANR), le projet de recherche Gecko (1) – qui démarre – vise à lever les verrous qui bloquent cette technique en France. Coordonné par Ecome, il associe les expertises les plus pointues afin de mieux comprendre le comportement des sols sous contrainte thermique. En jeu, l'optimisation technico-économique du système par le couplage avec des panneaux solaires, utilisés pour régénérer la batterie géothermique qu'est le sous-sol. En Suisse, l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), berceau de la recherche dans le domaine, scrute et analyse le comportement d'un groupe de pieux soumis à des variations thermiques (voir illustration ci-contre). Elle réfléchit aussi à la façon d'intégrer les tubes échangeurs dans les tirants d'ancrage des tunnels et les parois de soutènement des tranchées couvertes.

(1) Coordonné par Ecome, le projet associe l'ex-Laboratoire des Ponts/Ifsttar; le Laboratoire environnement, géomécanique et ouvrages/Laego à Nancy; l'EPFL de Lausanne; le Laboratoire génie civil et géo-environnement à Lille et le Bureau de recherches géologiques et minières/BRGM.



Si le comportement d'un pieu isolé est bien connu, celui d'un groupe de pieux l'est encore mal. Pour l'étudier, l'EPFL a créé une simulation numérique 3D aux éléments finis d'un groupe de neuf pieux (illustration ci-contre).

Entre autres expériences, l'étude des champs de températures induits lorsque les pieux sont chauffés à 60 °C (image en bas à gauche), ou les effets d'un chauffage asymétrique sur les contraintes mécaniques dans et autour des pieux (image en bas à droite).



► Géotechnique

(●●●) «Mais dans l'immense majorité des cas, les variations de température sont faibles et ne présentent aucun risque structurel particulier», assure l'expert. Les retours d'expériences européens, positifs et parfois presque trentennaires, sont là pour le prouver. Malgré cela, en l'absence de corpus normatif ou de règles de l'art spécifiques, le procédé ne convainc pas toujours les bureaux de contrôle et peine encore à se diffuser largement. Mais la situation pourrait évoluer rapidement. Le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) avait piloté un état de l'art sur le sujet à travers le projet Cofoge (Conception des fondations géothermiques) en 2007, mais n'avait jusqu'ici délivré que deux ATEx (appréciations techniques d'expérimentation). Il devrait prochainement délivrer un premier avis technique à Ecome Géothermie professionnelle. La délivrance d'un tel «sésame» renforcerait la crédibilité du procédé. Une initiative des géotechniciens pourrait également porter ses fruits. «Suite à la table ronde organisée sur la technique, aux Rencontres de l'ingénierie en 2010, qui avait remporté un franc succès, le comité géotechnique de Syntec Ingénierie a décidé de créer un groupe de travail sur le sujet», explique Jean-François Heitz, pilote du groupe. Il devrait en sortir, au printemps 2012, un recueil de recommandations à destination des professionnels. ■ Olivier Baumann



Le bâtiment en R+2 (image de synthèse en haut) est fondé sur 56 pieux de 13 mètres de long et de 50 à 60 cm de diamètre. Les cages d'armatures sont prééquipées des tubes échangeurs avant d'être mises en place au fond de forages creusés à la tarière (photo principale). Une fois le pieu coulé, les extrémités des tubes sont récupérées en tête.

FICHE TECHNIQUE Maître d'ouvrage : Efidis. Maître d'œuvre géotechnique : Antéa. BET fluides : Axelios. Entreprises : Soletanche Bachy Pieux (fondations), Géothermie professionnelle (équipement des pieux).

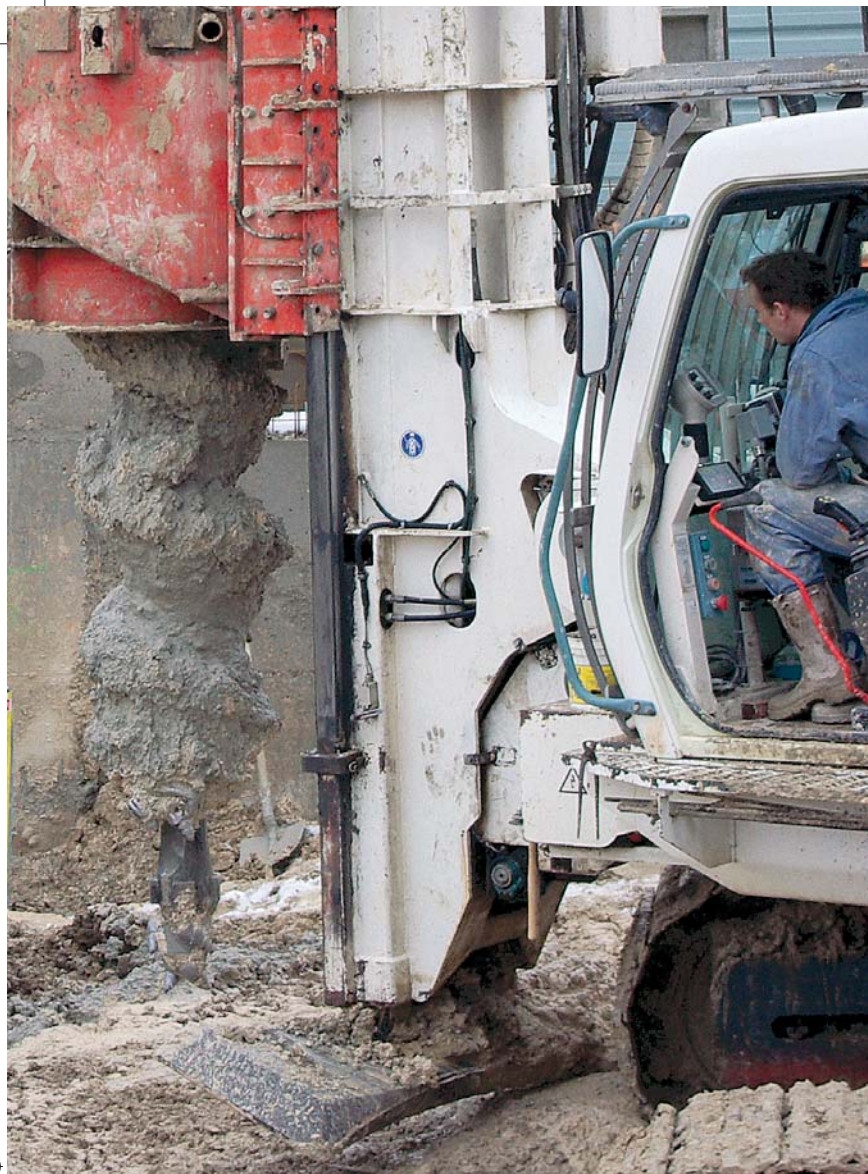
PHOTOS EFIDIS



SOLETANCHE BACHY

TYPLOGIE Des pieux à la paroi moulée,

Les pieux sont les fondations profondes les plus couramment mises en œuvre. En toute logique, les pieux géothermiques (photo 1) sont de ce fait les géostructures énergétiques les plus nombreuses. Dans certains pays, elles sont monnaie courante : l'Autriche en comptait 23000 en 2004, et l'Angleterre 5000 en 2008. L'un des exemples les plus illustres est celui du terminal de l'aéroport de Zurich, en Suisse, où 300 pieux de gros diamètre (90 cm à 150 cm) ancrés à 30 m de profondeur fournissent une puissance de 630 kW. Mais si le pieu est roi, tous les types de fondations peuvent être transformés en échangeurs de chaleur. Ainsi des parois de soutènement (parois moulées, parois berlinoises...), avec la tour Odéon en cours de construction à Monaco (photo 2), par exemple, dont les parois moulées et les barrettes de fondation intègrent 20 km de tubes échangeurs (voir «Le Moniteur» du 25 novembre 2011, p.38). Ou la tour Uniqa, à Vienne, reconnue par le programme européen «Green Building», dont les 55 barrettes fournissent 420 kW de puissance. Les radiers de fondation situés suffisamment en profondeur peuvent également être équipés, à l'instar du nouveau parking Vinci Park Parmentier, à Neuilly-sur-Seine (photo 3), dont 300 m² de la dalle de fondation sont équipés. Reliés à une pompe à chaleur (PAC), les tubes échangeurs suffisent à chauffer et à rafraîchir les locaux techniques et d'accueil du parking. Plus rare est l'équipement de la voûte des tunnels et des parois des tranchées couvertes (symbolisé par l'image 4). Utilisé pour chauffer les stations de métro ou les bâtiments à proximité, le procédé a déjà été mis en œuvre dans le métro de Vienne, en Autriche, et dans celui de Stuttgart, en Allemagne. Si l'expérience n'a pas encore été tentée en France, la technique suscite d'ores et déjà l'intérêt de la RATP dans le cadre de l'extension du réseau. Enfin, l'intégration des tubes échangeurs dans les fondations superficielles (dallages, semelles...) ne semble pas très recommandée vu le faible volume de terrain mobilisé et les pathologies que celles-ci subissent fréquemment (tassements différentiels, sols gonflants...).



INNOVATION

Les premiers logements sur pieux géothermiques

■ Au premier coup d'œil, le programme de 23 logements sociaux en cours de construction pour Efidis, à Limay (Yvelines), n'a rien d'exceptionnel. C'est sous terre que l'opération innove. Les 56 pieux de 13 mètres de long qui fondent l'ouvrage, nécessaires en raison de la médiocrité du sous-sol, intègrent en effet des tubes échangeurs qui vont permettre de chauffer et rafraîchir les logements. Une solution inédite poussée par le maître d'ouvrage dès qu'il a su que les fondations seraient des pieux. Après avoir vérifié, en phase d'avant-projet définitif (APD), que la nappe phréatique à faible profondeur était suffisamment dynamique et que la conductivité thermique du sol était convenable, le maître d'œuvre Antea a conçu une solution par pieux géothermiques et l'a inscrite au cahier des clauses techniques particulières (CCTP). L'offre proposée par le groupement d'entreprises sélectionné (Soletanche Bachy avec Géothermie professionnelle) permet à Efidis de sortir gagnant. «Le surcoût à l'investissement pour l'équipement des pieux (tuyauterie verticale et horizontale, monitoring...) et la pompe à chaleur est de 3% par rapport à la solution traditionnelle par chaudière gaz», explique José Cumont, responsable principal de programmes chez Efidis. Mais les frais de fonctionnement annuels sont diminués de 14%, ce qui permet un retour sur investissement rapide. Cerise sur le gâteau, les locataires bénéficieront l'été d'un rafraîchissement par géocooling sans aucun surcoût et le bâtiment, qui aurait visé un label HPE 2005 en solution traditionnelle, peut cette fois prétendre au label BBC Effinergie!

la vaste panoplie des fondations géothermiques

