

CHAUFFERIES

REEMPLACER LES CHAUDIÈRES PAR DES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES

TEXTE : PASCAL POGGI
PHOTOS &
ILLUSTRATIONS : BRGM,
BRGM/CONNEXITÉS,
BURGEAP, CARRIER,
CELCIUS, GROUPE
MARZOCCO, PASCAL
POGGI/AQC, VIESSMANN

Remplacer des chaudières existantes par des pompes à chaleur géothermiques devient possible grâce aux nouvelles générations de machines, et même très rentable lorsque le bâtiment doit également être rafraîchi.

Photo © Groupe Marzocco

La tour Odéon à Monaco – 49 étages et 175 m de hauteur – est équipée de 17 km de sondes géothermiques en boucle fermée.

En tertiaire, sauf dans les IGH, une installation classique de génie climatique associe des groupes de production d'eau glacée pour le rafraîchissement, des chaudières pour la production du chauffage et des émetteurs réversibles pour la diffusion dans le bâtiment. Dans ce type d'installation, les groupes de production d'eau glacée sont le plus souvent installés au sous-sol et raccordés à des aéroréfrigérants sur le toit qui dissipent la chaleur extraite du bâtiment. Les chaudières, au sous-sol également, sont raccordées à des conduits de fumées sortant au-dessus de la toiture. Ce schéma classique impose plusieurs contraintes : il faut entretenir et ramoner les conduits de fumée ; en toiture, la puissance des aéroréfrigérants peut être limitée par des contraintes acoustiques imposées par le voisinage ; il faut aussi nettoyer les échangeurs des aéroréfrigérants...

Lorsqu'une telle installation doit être rénovée, les bureaux d'études songent désormais à une autre solution : l'implantation de pompes à chaleur géothermiques. La performance de ce type d'installation est très élevée, il n'y a plus d'aéroréfrigérant en toiture ni de conduit de fumée. Les Pac géothermiques chauffent, produisent de l'eau chaude sanitaire, du rafraîchissement, simultanément s'il s'agit de thermofrigopompes. Et elles sont reconnues comme ENR (énergie renouvelable). Néanmoins, cela nécessite un ou plusieurs forages géothermiques plutôt coûteux. Deux start-up françaises ont imaginé des solutions pour réduire et contenir ce coût.

La géothermie de minime importance

Remplacer les chaudières en chaufferie par des pompes à chaleur relève de la géothermie de faible profondeur, dite aussi géothermie de surface, mais connue en France sous l'appellation «géothermie de minime importance». Deux solutions sont techniquement possibles pour la mise en œuvre de la géothermie de minime importance, nous nous >>>

▶ **1** En Hollande, des lotissements entiers sont traités pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire par des Pac sur boucles géothermiques fermées, soit maison par maison, soit en créant une mini-distribution de chauffage urbain alimenté par quelques Pac géothermiques.



Photo © 2020 - Pascal Poggi - AOC

1

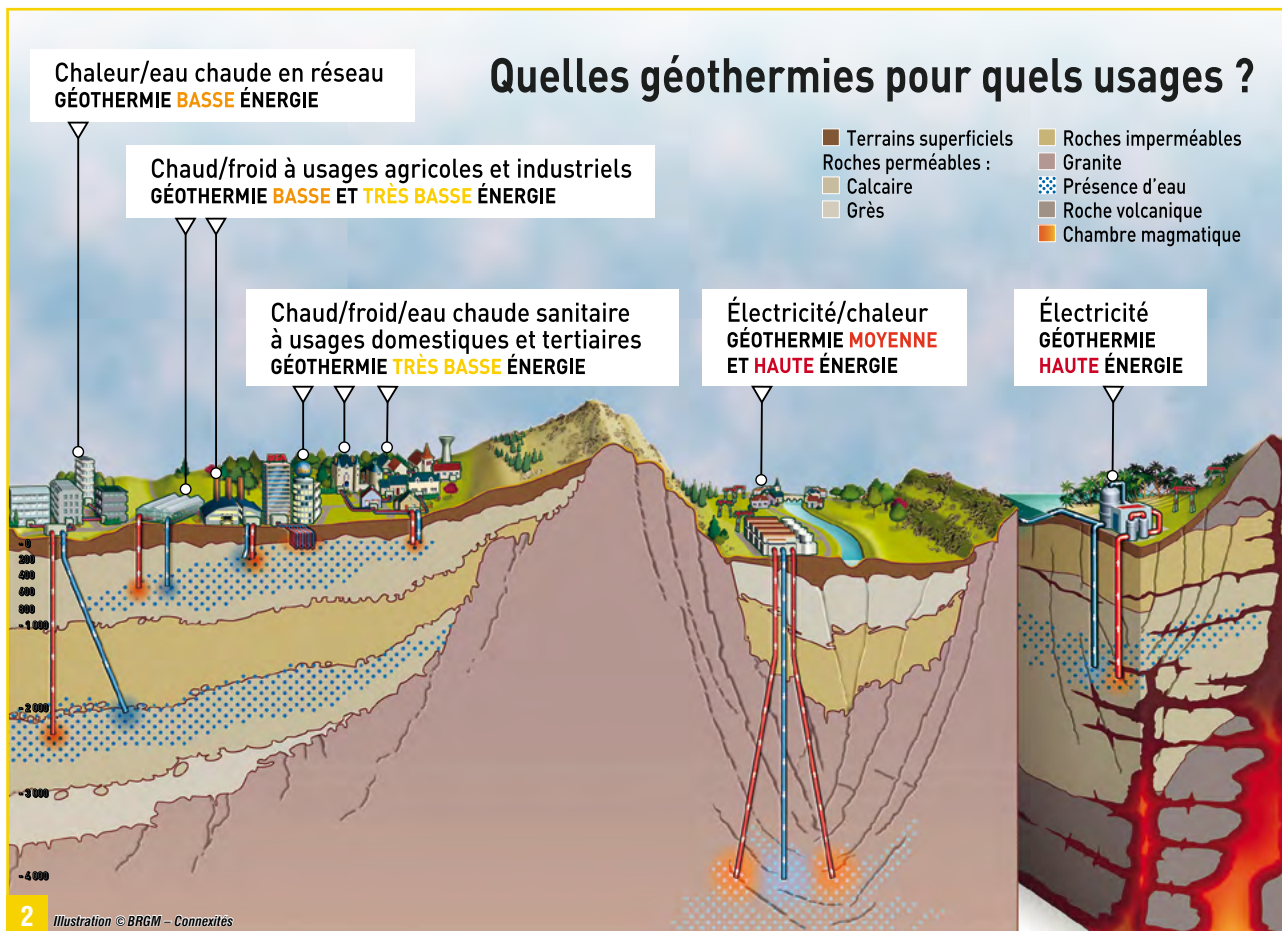
LES FINANCEMENTS DISPONIBLES

Selon le ministère de la Transition écologique et solidaire, le Fonds Chaleur, géré par l'Ademe, a financé depuis 2009 plus de 360 installations sur nappe superficielle ou sur champ de sondes. Les types d'installations financés par le Fonds Chaleur ont été modifiés début 2020 (1). Dans le cas de la géothermie, les aides à l'investissement

du Fonds Chaleur portent notamment sur les études de faisabilité pour la mise en place d'une Pac sur nappe ou sur champs de sondes. Une analyse des opérations financées par l'Ademe en 2013, menée par l'AFPG (Association française des professionnels de la géothermie), montrait des subventions maximales de 325 €/Tep pour les installations

produisant de 3 à 12 TepENR/an, soit des puissances de 35 à 140 kW, et de 415 €/Tep pour les installations produisant plus de 12 TepENR/an, donc d'une puissance supérieure à 140 kW. Localement, les nouvelles Grandes Régions ont aussi développé diverses politiques de soutien au développement des Pac géothermiques. ■

(1) Les grandes orientations et modalités 2020 du Fonds Chaleur sont disponibles ici : www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref.

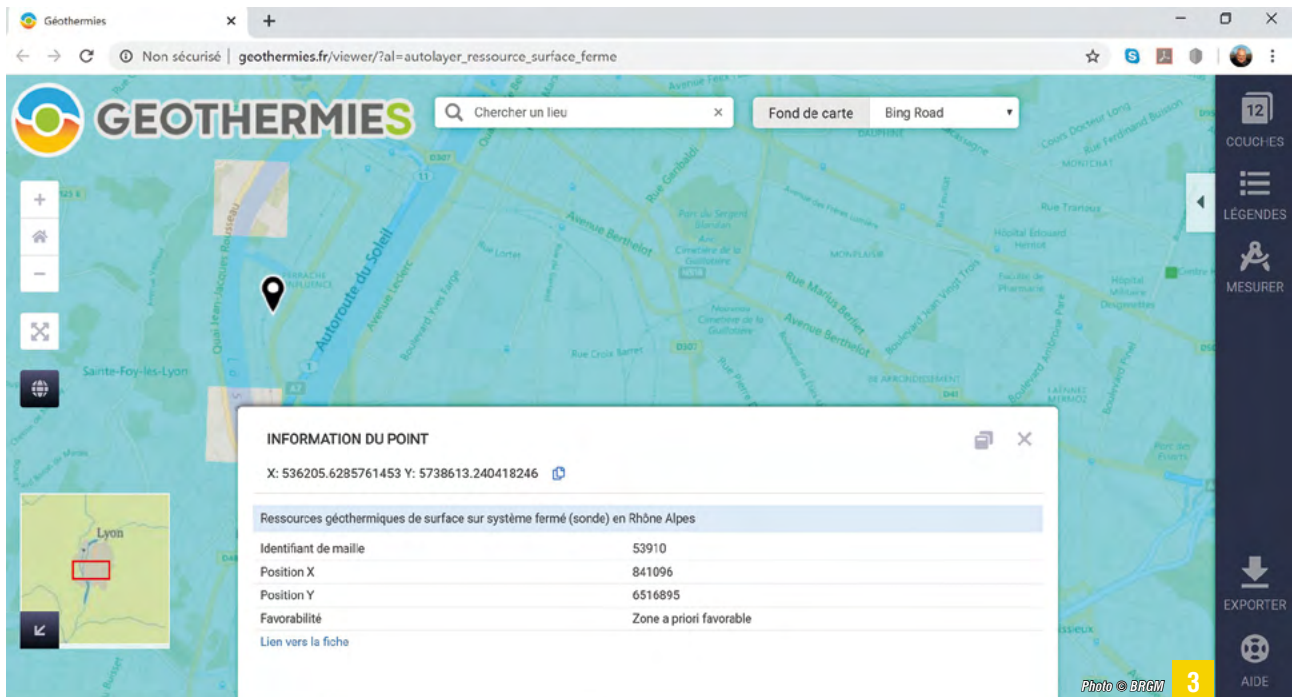


RÉCHAUFFER LE SOL POUR MAINTENIR LE RENDEMENT DES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE SUR BOUCLE FERMÉE

Lors du dimensionnement d'un projet de géothermie, les besoins de chaleur du bâtiment doivent être en équilibre avec la capacité du sol à livrer de la chaleur pendant toute la durée d'exploitation du système, soit 30 à 50 ans. Si la sonde est sous-dimensionnée, la quantité de chaleur prélevée baissera de manière excessive dans le temps, entraînant une réduction du rendement de l'installation. Pour compenser la réduction du rendement, la pompe à chaleur tournera davantage, ce qui entraînera une surconsommation d'électricité et une réduction de sa durée de vie. Dans le pire des cas, la sonde verticale pourrait devenir suffisamment froide pour entraîner le gel du terrain qui l'environne et susciter un risque

d'affaissement au moment du dégel. Même si l'installation est correctement dimensionnée, le prélèvement de chaleur provoque généralement une baisse de 1 à 4 °C de la température moyenne du terrain autour de la sonde. Ce qui entraîne une légère baisse du coefficient de performance de la pompe à chaleur. Après 5 à 7 ans d'exploitation, le système atteint un équilibre et la température du sol se stabilise. Tout le risque que nous décrivons disparaît si l'installation fonctionne en chauffage et en rafraîchissement : elle refroidit le sol en période de chauffage, mais le réchauffe en période de refroidissement du bâtiment. Si l'installation ne fonctionne qu'en prélèvement de chaleur, pour le

chauffage et/ou la production d'eau chaude sanitaire, il est pour autant possible de la coupler avec des panneaux solaires thermiques. Durant la période de non-chauffage, la quantité de chaleur produite par les panneaux solaires et non utilisée pour la production d'ECS sert à réchauffer le sol par l'intermédiaire d'un échangeur entre l'eau glycolée de la sonde dont la pompe est maintenue en fonctionnement et le fluide caloporteur des panneaux. Dans les deux cas, chauffage et rafraîchissement ou utilisation de panneaux solaires pour recharger le gisement, la température du sol ne baisse pas dans le temps et l'installation conserve son rendement indéfiniment. ■



focaliserons sur l'une d'entre elles : l'exploitation de la chaleur du sous-sol par un forage en boucle fermée dans laquelle circule de l'eau glycolée, avec moins de 200 m de profondeur de forage et une puissance thermique maximale inférieure à 500 kW. L'autre solution possible, le puisage/réinjection en nappe, dit échangeur géothermique sur boucle ouverte, obéit aux mêmes restrictions – moins de 200 m de profondeur et 500 kW de puissance au maximum – mais rajoute quatre obligations : la température de l'eau prélevée doit être inférieure à 25 °C, les débits pompes dans l'aquifère sont inférieurs à 80 m³/h, les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes prélevés et les volumes réinjectés est nulle, et enfin la variation de température dans la nappe dans un rayon de 200 m autour du rejet doit être inférieure à 4 °C. Nous écartons cette seconde solution du champ de cet article – sauf un exemple particulier associant géothermie en boucle ouverte et pompe à chaleur sur boucle d'eau que nous évoquerons –, pour deux raisons. Premièrement, si les ressources en nappes sont largement disponibles sur le territoire français, elles ne sont pas présentes partout et peuvent s'accompagner de difficultés techniques d'exploitation, comme des eaux fortement corrosives ou sous pression et susceptibles de jaillissement en cas de forage. Deuxièmement, cette solution implique l'installation d'une pompe immergée en nappe, dont l'entretien annuel nécessaire peut être complexe et coûteux. La géothermie de minime importance sur boucle fermée, en revanche, peut être mise en œuvre virtuellement partout, tout en respectant les contraintes d'implantation listées plus loin, sauf bien sûr s'il existe des obstacles sur le parcours du forage : espaces vides importants dans le sol, installations souterraines...

(1) Sur www.qualit-enr.org/annuaire, choisir « Forage géothermique » dans l'onglet « Quoi ».



2 Parmi toutes les technologies de géothermie disponibles, l'une des plus simples à mettre en œuvre est la numéro 2 sur l'illustration : des sondes géothermiques à boucles fermées descendant à 200 m de profondeur au maximum et alimentant des installations d'une puissance inférieure à 500 kW.



3 En première approche, il est possible de connaître les ressources géothermiques potentielles du sous-sol sur une grande partie du territoire français grâce aux atlas réalisés et maintenus par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) (https://www.geothermies.fr/viewer/?al=autolayer_ressource_surface_ferme).

Réglementation de la géothermie de minime importance

Avec le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015, modifiant le décret n° 78-498, les ouvrages dits de minime importance (profondeur comprise entre 10 et 200 mètres et équipements de moins de 500 kW) bénéficient d'un régime déclaratif simplifié. Ce qui signifie qu'ils n'ont pas besoin d'une autorisation préalable. Or une puissance de 500 kW est suffisante pour chauffer simultanément plus de 100 logements répondant aux exigences thermiques de la Réglementation RT 2012 pour les bâtiments neufs ou disposant du label « Bâtiment basse consommation énergétique rénovation », dit BBC Rénovation, pour les bâtiments existants.

Les forages qui relèvent de la géothermie de minime importance (GMI) doivent être déclarés sur le site <https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/> : déclaration d'une nouvelle GMI, changement d'exploitant d'une GMI existante, modification d'une GMI déjà déclarée, arrêt d'une GMI. Une fois la déclaration effectuée, le site délivre une preuve de dépôt de la déclaration. Ce qui est réputé valoir accomplissement de diverses procédures, notamment celle prévue par l'article L.411-1 du Code minier : « Toute personne exécutant un sondage, un ouvrage souterrain, un travail de fouille, quel qu'en soit l'objet, dont la profondeur dépasse dix mètres au-dessous de la surface du sol, doit déposer une déclaration préalable auprès de l'autorité administrative compétente. » Tout est dans les mots : déclaration préalable et non autorisation préalable.

La réglementation impose que les forages dans le cadre d'une GMI soient réalisés par des entreprises qualifiées RGE forage. Deux sous-qualifications existent : nappe ou sonde (boucle fermée). La liste des entreprises qualifiées est disponible sur le site de Qualit'ENR (1).





4 Photo © Carrier

En ce qui concerne la GMI, le BRGM a divisé la France en trois zones. En zone verte, aucun risque n'est identifié, mais il faut tout de même recourir à un foreur qualifié RGE Forage. En zone orange, la réalisation de l'ouvrage requiert une attestation préalable établie par un « Expert GMI » agréé, ainsi que le recours à un foreur qualifié RGE Forage. Dans sa dernière version, datant du 4 février 2019, la liste des experts agréés GMI compte 18 entreprises et est disponible sur le site de l'AFPG, l'Association française des professionnels de la géothermie (2). Dans la zone rouge, le régime déclaratif simplifié est suspendu pour la GMI et il faut passer par la procédure de l'autorisation préalable comme pour une installation de géothermie de moyenne ou grande importance. Pour une installation de GMI, cette procédure, à la fois longue et coûteuse, est complètement dissuasive. Elle pousse alors à envisager, si c'est possible, la solution Pac à eau glycolée et aérorefrigérant ou bien Pac air/eau à l'extérieur du bâtiment.

Enfin, il existe quelques règles d'implantation d'un échangeur géothermique à boucle fermée en GMI. Interdit dans le périmètre de protection immédiat ou rapproché d'un captage d'eau, il doit être implanté à au moins 35 m d'un ouvrage souterrain de prélèvement d'eau destiné à la consommation humaine, d'un stockage d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines, d'ouvrages de traitement des eaux usées, de bâtiments d'élevage et de leurs annexes relevant des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Il doit être implanté à au moins 200 m d'une installation de stockage de déchets relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des ICPE. Enfin, il doit être implanté à au moins 5 m de la limite de propriété la plus proche,

(2) Sur www.afpg.asso.fr, rubrique « Téléchargements » puis « Liste des experts GMI ».

sauf accord écrit du propriétaire, et des conduites, collectives ou non collectives (DICT), d'eaux usées ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines.

Présence obligatoire d'une pompe à chaleur

La géothermie à usage exclusivement thermique consiste à exploiter les ressources à des températures allant de 10 à 15 °C jusqu'à 90 °C, voire parfois au-delà de 100 °C. Mais la géothermie de minime importance, dite « très basse énergie », exploite les premières dizaines de mètres sous la surface, où la température du sous-sol est inférieure à 30 °C et généralement comprise entre 12 et 15 °C. L'énergie thermique extraite de ces forages est réduite et ces derniers sont nécessairement associés à des pompes à chaleur. Une installation de pompe à chaleur sur un forage GMI est capable de chauffer et de rafraîchir, soit activement avec une Pac réversible, soit passivement en géocooling, pompe à chaleur arrêtée, par échange direct de température entre l'eau glycolée qui circule dans le forage et l'installation intérieure de distribution de froid. Si les pompes à chaleur sont du type thermofrigopompe, elles savent simultanément chauffer et rafraîchir. Ce qui peut être particulièrement utile dans les bâtiments tertiaires contenant des serveurs informatiques, par exemple.

Dans le bâtiment, les émetteurs requis sont à circulation d'eau, bien connus des professionnels et tout à fait classiques : radiateurs basse température (≤ 60 °C de départ d'eau pour la température extérieure de consigne) si on ne souhaite que du chauffage, ventilo-convecteurs, planchers basse température, poutres ou plafond si on souhaite du chauffage et du rafraîchissement. Si l'installation doit distribuer simultanément chauffage et rafraîchissement, il faut des émetteurs raccordés en quatre tubes. La batterie chaude et la batterie froide d'une CTA (Centrale de traitement d'air) peuvent naturellement être alimentées par la même installation.

Il peut paraître curieux de s'intéresser aujourd'hui à la technique des pompes à chaleur géothermique. Elle a en effet connu son heure de gloire il y a une dizaine d'années avec 19430 Pac géothermiques vendues en France en 2008, quasiment en totalité des appareils domestiques. L'an dernier, selon Uniclimate, il s'est vendu 2582 Pac géothermiques, dont seulement 22 de plus de 50 kW. Le marché n'est pas encore au rendez-vous, c'est clair. Mais l'offre est disponible.

Les offres de Pac géothermiques adaptées sont nombreuses

Les pompes à chaleur adaptées à une installation GMI sont avant tout proposées par des marques européennes et américaines, même si certaines de ces marques ont été acquises par des fabricants japonais. Ce sont des pompes à chaleur eau glycolée/eau, réversibles ou pas, et des thermofrigopompes eau glycolée/eau qui produisent simultanément de la chaleur et du froid. Ces thermofrigopompes comportent 6 tubes : deux tubes pour l'aller et retour vers l'échangeur eau glycolée, deux tubes de départ chauffage, deux tubes de départ rafraîchissement. >>>



4 Les machines **Aquaforce 30XW** de Carrier sont des **thermofrigopompes eau/eau, capables de produire de la chaleur et du froid simultanément, tout en étant raccordées à un condenseur à eau ou à des boucles géothermiques fermées. Elles sont disponibles dans une gamme de puissance étendue de 250 à 3467 kW en mode froid.**



5 Ce bâtiment historique de la manufacture de Saint-Étienne a été rénové en 2012 au standard **Passivhaus** par l'atelier d'architecture **Rivat** qui en a fait son siège. Il est équipé d'une **ventilation double flux chauffée et rafraîchie par une pompe à chaleur eau glycolée/eau raccordée à deux forages en boucles fermées de 99 m de profondeur. Pour le complément de chauffage, la Pac alimente un plancher chauffant basse température. En été, elle contribue au rafraîchissement directement par géocooling.**



Photo © 2020 – Pascal Poggi – AOC

5

QUELLE QUANTITÉ D'ÉNERGIE EST RÉCUPÉRABLE EN GÉOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE ?

En Europe centrale, à une profondeur de 10 à 20 m, la température du sol est influencée par le climat et se situe en moyenne à 12 °C. En revanche, à partir d'une profondeur de 25 à 30 m environ, la loi du gradient géothermique prévaut : la température du sol augmente de 1 °C en moyenne tous les 33 m de profondeur.

Pour les sondes géothermiques en boucle fermée qui ne descendent pas à plus de 200 m de profondeur, la température du sol en été est en général plus faible que la température de l'air ambiant. L'installation peut donc contribuer à rafraîchir le bâtiment de manière passive par geocooling, sans mise en route des pompes à chaleur.

Ceci posé, les caractéristiques du sous-sol conditionnent le dimensionnement

d'une installation de géothermie. L'AFPG (Association française des professionnels de la géothermie) indique les valeurs de conductivité thermique de différents sols (voir tableau ci-dessous). Comme le dit l'AFPG : « Un forage peut traverser des formations de natures différentes et en conséquence la conductivité thermique

Type de sol	Conductivité thermique en W/m.K
Argile	1,9
Sable sec	0,5
Sable mouillé	2,3
Granite	2,8
Calcaire	2,8
Schiste	1,9

d'une sonde sera la somme des conductivités de chacune des formations rencontrées. Le tableau met bien en évidence l'avantage d'un sol mouillé par rapport à un sol sec. En effet, le sable mouillé présente une conductivité thermique 4,6 fois supérieure à celle du sable sec (1). »

Une valeur de 40 W d'extraction de chaleur par mètre de sonde réalisée est considérée comme basse et une valeur de 60 W/m est considérée comme excellente. ■

(1) L'étude technico-économique Géothermie assistée par pompe à chaleur (juillet 2014) est téléchargeable sur www.afpg.asso.fr, rubrique « Téléchargements » puis « Étude technico-économique ».

Si, à un moment donné, les besoins en chaleur et en froid sont identiques, la thermofrigopompe atteint un équilibre et fonctionne de manière autonome, sans appoint du circuit enterré.

Viessmann, par exemple, propose quatre gammes de pompes à chaleur réversibles eau glycolée/eau. Les Pac *Vitocal 200-G Pro* sont disponibles pour des puissances de 75,4 ou 101 kW, mesurées à B0/W35 en mode chauffage (3), avec un Cop de 4,7 et une empreinte au sol de 1 753 x 800 x 1 457 mm. En mode rafraîchissement, leurs puissances sont de 59,2 et 79,3 kW. Ensuite, la gamme *Vitocal 300-G Pro* offre 5 modèles de 84,8 à 222 kW chaud (B0/W35) et de 67,6 à 177,4 kW froid. Les Pac sont cascadables jusqu'à 1 110 kW chauffage. La gamme *Vitocal 350-G Pro* compte 10 modèles dont les puissances varient de 27,2 à 197 kW. Leur température de départ d'eau maximale atteint 73 °C et elles affichent un Cop de 4,4 à B0/W35. Cette gamme *Vitocal 350-G Pro* connaît une seconde déclinaison avec un échangeur à plaques compact : 5 modèles de 223 à 564 kW chauffage (B0/W35), une température de départ d'eau maximale de 65 °C, des Cop variant de 4,49 à 4,71. Cette dernière gamme est optimisée pour le rafraîchissement : les puissances froid – 259 à 661 kW – sont plus élevées que les puissances chauffage, tout comme les EER (Energy efficiency ratio, la mesure de la performance à puissance nominale en froid) dépassent leurs Cop, variant de 4,73 à 5,02. Les deux gammes *Vitocal 350-G Pro* offrent des températures de départ d'eau suffisamment élevées pour pouvoir confortablement produire de l'ECS et même réaliser des traitements anti-légionnelles par surchauffe des ballons de stockage d'ECS.

Côté thermofrigopompes, Carrier et Lennox sont des spécialistes reconnus. Les fabricants italiens, Aermec, Climaveneta (rachetée par Mitsubishi Electric), Clivet et d'autres, ont popularisé le concept. Les industriels du nord de l'Europe comme Swegon (avec sa gamme *Omicron Rev* de 100 à 944 kW) ou Nibe en proposent également. En France, Johnson Controls fabrique des thermofrigopompes de forte puissance à Nantes, ETT développe une gamme utilisant le propane comme fluide frigorigène, Clauger en propose pour des utilisations en industrie. SDEEC propose des thermofrigopompes au R410A de 54 à 300 kW et, avec Bouygues Energies & Services, en a équipé le bâtiment de bureaux à énergie positive « BE Issy », livré en juillet 2018 à Issy-les-Moulineaux (92).

La difficulté réside dans le coût du forage

Une enquête réalisée par l'AFFPG en 2014 a fait ressortir des prix moyens de forage et d'installation de sonde en boucle fermée allant de 55 à 85 €/m. Si l'on considère une valeur moyenne de 50 W récupérés par mètre linéaire de sonde, une installation dont le besoin s'élève à 1 MW suppose 20 000 m de sondes, soit 50 sondes de 200 m de profondeur ou 100 sondes de 100 m (4) et un investissement de 1 100 000 à



6 Photo © Viessmann

▲
6 Pac cascadeable *Vitocal 300-G Pro*.

▶
7 Dans l'immeuble « BE Issy » livré en 2018, deux thermofrigopompes eau/eau six tubes puisent et rejettent l'eau en nappe par deux puits de 60 m de profondeur à travers un échangeur géothermie. Si elles ne suffisent plus pour couvrir les besoins de chaleur ou de froid du bâtiment, deux pompes à chaleur eau/eau *BlueBox* viennent en relève.

8 Pour la plus grosse partie de la tour Odéon à Monaco, deux thermofrigopompes *Carrier 30 HXC* d'une puissance unitaire de 900 kW chaud et de 750 kW froid, fonctionnant au R134a, produisent simultanément et toute l'année de l'eau chaude à 63 °C et de l'eau glacée à 7 °C. Elles sont utilisées pour le chauffage, pour la climatisation et pour la production d'ECS centralisée. Ces machines eau glycolée/eau sont raccordées à des sondes géothermiques qui ont été incorporées dans 1 000 barrettes de fondations. Au total, cela représente 17 km de sondes.



7 Photo © 2020 - Pascal Poggi - AOC

(3) B0/W35 signifie température du sol à 0 °C et départ d'eau vers l'installation de chauffage à 35 °C.

(4) Les sondes sont toujours en U : 100 m de profondeur = 200 ml de sonde.



Photo © 2020 – Pascal Poggi – AOC

8



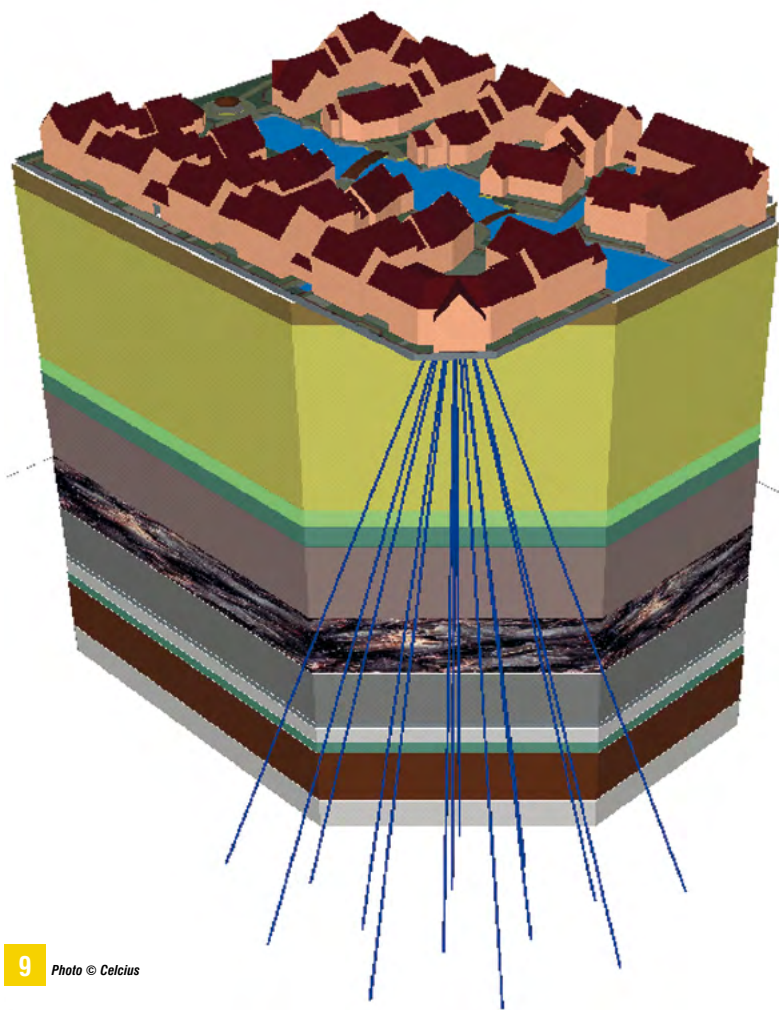
1 700 000 euros, simplement pour les forages et les sondes. De plus, sur le chantier, le coût des sondes est proportionnel au nombre de forages requis, sans grand gain de productivité possible. Enfin, la surface de sol nécessaire est considérable. Dans notre exemple de 1 MW de puissance, il faut espacer les 100 sondes de 100 m de profondeur de 10 m les unes des autres pour ne pas compromettre le rendement. Si on les dispose en damier, cela représente une surface de $90 \times 90 \text{ m} = 8\,100 \text{ m}^2$. Que faire pour réduire ces coûts et la surface de sol nécessaire ? Deux start-up françaises proposent deux réponses différentes.

Capitaliser sur la technologie de forage de Schlumberger

Celsius Energy (5), la première start-up, est née au sein de Schlumberger, le spécialiste des services pétroliers. Schlumberger fore pour le compte de compagnies pétrolières partout dans le monde. En 2018, l'entreprise s'est mise à réfléchir à la manière dont elle pourrait valoriser ses technologies dans un autre contexte que l'industrie pétrolière et gazière. Elle a encouragé son personnel à développer des idées et à créer des entreprises soutenues par Schlumberger. Créée en décembre 2018, Celsius Energy est opérationnelle depuis janvier 2019. Début 2020, l'entreprise occupe 15 personnes, fait partie de la branche « Schlumberger Nouvelles Energies » et a été retenue par une initiative conjointe des Nations Unies et de Bloomberg parmi les « 50 Climate leaders ».



(5) www.celsius-energy.co/



9 Photo © Celsius

L'idée de Celsius Energy porte avant tout sur la réduction de l'encombrement en surface. L'entreprise s'appuie sur les technologies de forage en biais, développées de longue date par Schlumberger, et propose la réalisation de sondes en « hérisson » à partir de la surface. Pour un bâtiment de 20 000 m² existant, il faut habituellement creuser 70 puits de 120 à 150 m de profondeur, indique Cindy Demichel, l'une des fondatrices de Celsius Energy. Avec un écartement de 10 m entre chaque sonde, on aboutit à une surface au sol de l'ordre d'un terrain de football. Avec l'approche Celsius Energy, explique-t-elle, une surface de 100 m² sera utilisée durant les travaux de forage. Une fois les sondes installées, seule la surface de 10 m² qui abrite la tête de puits demeurera inutilisable pour d'autres usages. Chaque sonde Celsius Energy est associée à une fibre optique – une technologie de Schlumberger à nouveau – qui permet de suivre, en temps réel et avec une très grande précision, l'évolution du gradient de température mètre par mètre dans le forage. Ce qui indique la quantité de chaleur que l'on peut extraire ou ajouter au sol, à tout moment.

L'approche Celsius Energy est déployable massivement, sans incidence sur la productivité des terrains environnants. Cette technologie de forage, couplée avec des pompes à chaleur eau glycolée/eau, est capable d'assurer la totalité des besoins de rafraîchissement d'un bâtiment, mais aussi d'un

▲ Celsius, une start-up éclosée au sein de Schlumberger, un spécialiste des travaux et services pétroliers, optimise l'espace au sol en utilisant des technologies de forage en biais, développées pour l'industrie pétrolière.

quartier, ainsi que 70 à 80 % des besoins de chaleur dans l'existant et 100 % dans le neuf. Par rapport à une solution classique groupe froid + chaufferie gaz, même avec un appoint de chaleur par chaudière gaz dans l'existant, cette technologie réduit les émissions de gaz à effet de serre de 70 % par an et la consommation d'énergie primaire de 25 %.

Cindy Demichel estime que la solution de Celsius Energy réduit également les dépenses d'exploitation (maintenance-entretien) de 40 % environ par rapport à l'association chaufferie gaz + groupe froid. Avec au final, au prix actuel de l'énergie, un temps de retour de 7 à 10 ans. Celsius Energy propose un service complet : étude géologique, dimensionnement, suivi des travaux de forage et de pose des sondes réalisés par l'une des vingt entreprises de forage géothermique françaises, maintenance et suivi des performances dans le temps.

Le stockage d'énergie saisonnier

Accenta (6), la seconde start-up, a été lancée par Pierre Trémolières et accompagnée par le X-Tech Booster, autrement dit l'incubateur de l'École Polytechnique. Accenta a mis au point une solution bas carbone intelligente pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments tertiaires. Sa solution combine solaire thermique, solaire photovoltaïque, production de chaleur et de froid par Pac géothermique réversible eau/eau ou eau glycolée/eau, ventilation à récupération de chaleur et stockage d'énergie soit à court terme sous forme de stockage de glace, soit saisonnier dans le sol à l'aide de sondes géothermiques à boucle fermée. Le système est accompagné d'un dimensionnement particulièrement attentif des ouvrages, tant les forages géothermiques que les installations de génie climatique en fonction des besoins réels du bâtiment à traiter. Selon Pierre Trémolières, les installations sont toujours très largement surdimensionnées, sans aucune nécessité ni aucun bénéfice. Le dimensionnement correct, selon lui, est une source majeure de réduction de l'investissement.

Accenta estime que les sondes géothermiques verticales constituent la solution la moins chère pour le stockage d'énergie à 6 mois, si un travail d'optimisation conduit à réduire le nombre de sondes. Accenta calcule la quantité de chaleur nécessaire pour passer l'hiver et faire face aux besoins de production d'ECS et dimensionne les sondes géothermiques au plus juste. Accenta utilise des pompes à chaleur Waterkotte, Aermec ou Carrier. L'une de ses réalisations exemplaires est le siège d'Airbus à Toulouse-Blagnac. Ce bâtiment de 36 000 m², certifié Breeam Very Good, est entièrement alimenté par une boucle d'eau tempérée géothermique. Cette boucle de 400 m de longueur est maintenue en température par 141 sondes verticales de 205 m de profondeur, couplées à des Pac de Waterkotte. Le système, toutes consommations d'énergie prises en compte, atteint un Cop global de 6,2. Accenta et sa GTB à intelligence artificielle assurent le pilotage de l'installation. >>>

(6) www.accenta.ai/



Photo © Celsius

10



Photo © Burgeap

11

▲
10 L'un des premiers chantiers de Celsius Energy est l'un des bâtiments Schlumberger à Clamart (92). Pour l'équiper, 15 puits ont été forés. Le circuit récupère 10 kW par puits, soit 150 kW au total à partir d'un seul forage en étoile. Un forage en étoile pourrait récupérer jusqu'à 200 kW avec 20 sondes. Par rapport à la chaufferie gaz antérieure, l'économie d'énergie sera de 60 % pour une diminution de 90 % de la production de gaz à effet de serre.

▼
11 Les 36 000 m² de bâtiments du nouveau siège d'Airbus à Toulouse-Blagnac sont chauffés et climatisés par 141 sondes géothermiques verticales associées à des Pac. Le travail d'ingénierie en amont a permis de dimensionner les sondes au plus juste.

LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES EN CASCADE

La plupart des grands constructeurs de pompes à chaleur eau glycolée/eau proposent des machines cascadables de puissance importante et de faible encombrement au sol. Cette solution rend les installations particulièrement fiables, puisqu'il est virtuellement impossible que toutes les Pac tombent en panne simultanément. Elle limite l'investissement en réduisant le coût du surdimensionnement, enfin elle améliore le bilan énergétique annuel en optimisant la régulation des Pac en cascade. Nibe, par exemple, propose la Pac eau glycolée/eau NIBE F1345 au R410A en 4 modèles de 24, 30, 40 et 60 kW sur une surface au sol de 60 x 62 cm. Il est possible d'associer jusqu'à 9 Pac en cascade pour atteindre 540 kW de puissance. La régulation de puissance de la cascade s'effectue, d'une part en enclenchant le fonctionnement des Pac les unes après les autres,

fournissant jusqu'à 9 paliers de puissance, et d'autre part en gérant les deux paliers de puissance disponibles dans chaque machine. En mode chauffage, une cascade de Pac NIBE F1345 de 540 kW peut donc moduler sa puissance par 18 paliers de 30 kW de 30 à 540 kW. D'autres constructeurs, comme Weishaupt, proposent des Pac pilotées par Inverter. Ce qui permet de construire des cascades avec une modulation de puissance linéaire de quelques kW à plusieurs centaines de kW. Réversible, la Pac NIBE F1345 peut produire du chauffage et, simultanément ou alternativement, du rafraîchissement. Le froid est obtenu de manière passive par échange direct avec les capteurs enterrés ou bien de manière active par la Pac. Même à une puissance de 60 kW, le volume de fluide frigorigène est inférieur au seuil qui déclenche une inspection annuelle : une inspection quinquennale suffit. En complément de sa Pac, Nibe propose quantité d'accessoires intéressants, comme, par exemple, le boîtier NIBE ACS 45 qui gère au niveau de l'ensemble de la cascade simultanément le chauffage et le rafraîchissement actif et passif en 4 tubes ou bien la carte NIBE EME 20 qui fournit une interface pour favoriser l'autoconsommation d'une production photovoltaïque sur site, avec une Pac F1345 ou une cascade de Pac F1345. On peut citer également le NIBE MODBUS 40, un module de communication pour la transmission des informations depuis et vers les systèmes de gestion du bâtiment via le protocole Modbus. Ou l'unité de réglage NIBE SOLAR 42 qui gère le raccordement de panneaux solaires thermiques à un ballon d'eau chaude sanitaire et les intègre dans le système de régulation de la Pac ou de la cascade de Pac. ■



Photo © Nibe



12 Photo © 2020 - Pascal Poggi - AOC

Combiner Pac géothermiques et Pac sur boucle d'eau

Tout notre article se focalise sur les installations géothermiques à boucle fermée. Il existe cependant un excellent exemple d'une installation géothermique à boucle ouverte, avec puisage et rejet : le Centre commercial d'Aéroville, près de l'Aéroport de Roissy. Il associe des Pac géothermiques sur boucle ouverte et des Pac sur boucle d'eau. Deux puits descendent à 100 m de profondeur et pompent de l'eau dans « l'aquifère yprésien », une nappe captive et sous pression. La température du puisage est stable à 14 °C toute l'année. Un local technique équipé de deux pompes à chaleur eau/eau (Lennox), fonctionnant au R410A, utilise cette eau de pompage à travers des échangeurs pour produire de l'eau à 9 °C en été, à 28 °C en hiver. Cette eau alimente une boucle d'eau qui fait le tour du bâtiment et distribue de l'eau à 23 °C (départ) / 30 °C (retour) en été, à 25 °C / 18 °C en hiver, à 180 boutiques dans le centre commercial. Chaque boutique a installé sur cette boucle une ou deux pompes à chaleur eau/air réversibles sur boucle d'eau.

Les 180 boutiques n'ont pas nécessairement les mêmes besoins au même moment. En mi-saison notamment, certaines sont en demande de chaleur, tandis que d'autres ont besoin de rafraîchissement. À un moment donné, la boucle d'eau est donc refroidie par les Pac des boutiques en demande de froid et réchauffée par celles qui fonctionnent en mode rafraîchissement. Ce qui, en mi-saison, produit un auto-équilibre de la boucle d'eau qui a moins besoin



Photo © 2020 - Pascal Poggi - AQC 13

d'apports de chaleur ou de froid par les Pac Lennox dans le local technique. D'ailleurs, lorsqu'on observe les diagrammes mensuels des débits de puisage dans l'aquifère, les mi-saisons automne et printemps montrent une nette réduction des puisages, ce qui correspond à la diminution de la sollicitation des Pac Lennox en ces périodes. Ce sont les moments dans l'année durant lesquels la boucle d'eau est proche de l'auto-équilibre.

Après cinq ans de fonctionnement de l'installation d'Aéroville, la température de l'aquifère yprésien demeure stable à 14 °C. Dans une telle opération - 2 puits de puisage, 4 puits de rejet à 100 m de profondeur -, le dimensionnement et l'équilibre hydrologique de l'installation sont très importants. Ce sont eux qui déterminent le débit maximum puisable, donc la quantité d'énergie que l'on peut prélever et remettre dans la nappe sans modifier sa température. Grâce à des études de dimensionnement et d'impact particulièrement poussées, cette installation a obtenu le droit de dépasser la limite de puisage de 80 m³/h dans la nappe. À Aéroville, le rejet se fait en aval du puisage, dans le sens de l'écoulement de l'aquifère. En 2017, 350 000 m³ d'eau ont été prélevés et remis dans l'aquifère. De mars à octobre, l'installation - la boucle d'eau et les Pac Lennox dans le local technique - fonctionne en mode froid. De novembre à février, elle bascule en mode chauffage. La puissance maximale instantanée en chauffage est de 1,3 MW. Ce qui correspond à un débit de puisage de 220 m³/h avec prélèvement de 5 °C avant rejet dans la nappe.



12 Le centre commercial d'Aéroville associe des Pac géothermiques sur boucle ouverte et des Pac sur boucle d'eau. Deux puits pompent de l'eau à 100 m de profondeur. Deux pompes à chaleur eau/eau (Lennox), fonctionnant au R410A, utilisent cette eau de pompage à travers des échangeurs pour produire de l'eau qui alimente une boucle d'eau qui fait le tour du bâtiment et distribue de l'eau à 180 boutiques dans le centre commercial.



13 Une batterie d'échangeurs à plaques permet de bypasser les pompes à chaleur pour fonctionner directement en géocooling pour rafraîchir la boucle d'eau. Près de 50 % des besoins de rafraîchissement sont couverts de cette façon.

La puissance maximale en mode froid est de 4,5 MW : 280 m³/h avec 14 °C de réchauffement du rejet. Si les Pac Lennox ne suffisent plus en été, la boucle d'eau peut également être refroidie par des aéroréfrigérants en toiture. En cinq ans, ces aéroréfrigérants n'ont jamais été mis en route.

Comme l'essentiel des besoins dans un centre commercial porte avant tout sur le rafraîchissement, le fonctionnement en boucle d'eau avec auto-équilibre en mi-saison contribue à la réduction des consommations d'énergie. Le fait que la boucle puisse être rafraîchie par géocooling pendant près de 50 % du temps de fonctionnement en mode froid - les Pac Lennox sont à l'arrêt, la boucle d'eau est refroidie directement par un échange entre le puisage et la boucle - fournit une autre source de réduction des consommations. Seules les consommations des pompes de puisage, des pompes de la boucle et des Pac sur boucle d'eau des boutiques interviennent alors. En mode géocooling total, sans fonctionnement des Pac Lennox, le Cop de l'installation dépasse 30. Unibail Rodamco Westfield, propriétaire d'Aéroville, estime réaliser au moins 30 % d'économie d'énergie par rapport à une solution classique : roof-tops ou groupes d'eau glacée plus chaudière et diffusion par ventilo-convecteurs 4 tubes. Du coup, le groupe se pose la question de la géothermie à chaque projet de nouveau centre commercial et de rénovation de son patrimoine existant. ■