

# Géothermie : des techniques au service du développement durable

Dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, la France a confirmé ses engagements de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. Il a également été décidé de « porter la part des énergies renouvelables à au moins 23 % de la consommation d'énergie finale d'ici à 2020 », ce qui correspond à une augmentation de 20 Mtep.

En ce qui concerne la géothermie, l'objectif est de multiplier par six la production d'énergie en 2020, en équipant de pompes à chaleur 2 millions de foyers et en relançant à grande échelle les programmes de géothermie profonde en Île-de-France, Alsace, Aquitaine, Midi-Pyrénées et dans le Centre. La géothermie devrait contribuer ainsi pour 1,3 million de tep à l'objectif fixé. À la même échéance, il est prévu que 20 % de l'électricité produite dans les DOM soit d'origine géothermique.

Après la présentation des principes généraux de la géothermie, cet article présente les différentes filières spécifiques applicables au bâtiment.

## > Sommaire

- 1 • Présentation
- 2 • Définitions
- 3 • Filières appliquées au bâtiment
- 4 • Aspects réglementaires
- 5 • Mesures incitatives
- 6 • Réalisations concrètes
- 7 • Conclusion
- 8 • Bibliographie

### Jean Lemale

*Ingénieur de l'École nationale supérieure des Arts et Métiers (ENSAM). Ancien expert à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).*

## 1 Présentation

Classée parmi les énergies renouvelables, la géothermie consiste à utiliser les propriétés thermiques du sous-sol à une profondeur plus ou moins grande. Elle est moins connue que les autres énergies renouvelables (solaire, éolien...) bien que son champ d'application soit très vaste et en pleine évolution.

La géothermie recouvre une grande diversité de filières et d'applications dans le domaine du chauffage, de la production d'électricité, de la climatisation et du stockage thermique. Les filières thermiques disponibles vont du chauffage de la maison individuelle à la distribution de chaleur *via* des réseaux de chaleur, en passant par la climatisation des immeubles du secteur tertiaire, et également par le chauffage de serres, de bassins de pisciculture, etc.

La filière la plus connue et la plus ancienne consiste à puiser de l'eau chaude dans les formations aquifères profondes des bassins sédimentaires. La France s'est fait dans les années 80 une spécialité dans le développement des réseaux de chaleur géothermiques notamment en Île-de-France où plus de 160 000 logements bénéficient actuellement de ce type d'énergie.

Il est possible en tout lieu de capter de la chaleur dans le sous-sol, soit dans des nappes d'eau plus ou moins profondes ou, à défaut, par échange avec le sol à faible profondeur (capteurs horizontaux ou verticaux). En général, pour les ressources à faible profondeur, le niveau de température doit être relevé au moyen de pompes à chaleur. Ces filières en plein développement sont connues sous l'intitulé « pompes à chaleur géothermiques ».

La géothermie présente certaines caractéristiques qui lui confèrent des avantages spécifiques appréciables qui s'inscrivent dans une démarche de développement durable : indépendance vis-à-vis des éléments extérieurs (conditions météorologiques), mobilisable en tout lieu, respect de l'environnement, performances énergétique et économique.

## 2 Définitions

La chaleur de la terre est bien connue par les phénomènes naturels tels que les volcans, geysers, sources chaudes, etc. Elle se caractérise en un lieu donné par son gradient de température, à savoir l'augmentation de la température en fonction de la profondeur. Ce gradient est variable selon les sites. En France, le gradient se situe en moyenne entre 3 et 4 °C/100 m mais il peut atteindre 10 °C par 100 m dans le nord de l'Alsace, voire plus dans les zones volcaniques notamment dans les départements d'outre-mer.

Le flux de chaleur issu de la terre est de 100 mW/m<sup>2</sup> en moyenne en France. La quantité de chaleur émise/km<sup>2</sup>/an est d'environ 75 tep (à comparer avec le solaire : 100 000 tep, le rapport est de 1/1 300). La géothermie n'est pas à proprement parlé une énergie de flux. Par contre, la quantité de chaleur emmagasinée dans le sous-sol est considérable et c'est cette énergie accumulée qui est prélevée. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre (fig. 1).

## 3 Filières appliquées au bâtiment

### 3.1 Réseaux de chaleur géothermiques

Les nombreux forages de recherche pétrolière réalisés dans la deuxième partie du XX<sup>e</sup> siècle dans les bassins sédimentaires du

territoire métropolitain ont mis évidence, à défaut de pétrole, des couches géologiques contenant de l'eau à des températures allant jusqu'à 85 °C. Les bassins sédimentaires particulièrement concernés sont le Bassin parisien et le Bassin Aquitain. L'eau peut y être puisée par forage à grande profondeur et les calories extraites peuvent ensuite être distribuées aux utilisateurs après échange. L'exploitation est faite en puits unique en Aquitaine et avec deux forages sur les formations profondes du Bassin parisien (technique du doublet), compte tenu de la salinité de l'eau à ces profondeurs.

Une opération type au sud de Paris est constituée par un forage de production et un forage de réinjection dans le même horizon géologique. La profondeur des forages est de l'ordre de 1 800 m, la température autour de 75 °C, le débit exploitable jusqu'à 300 m<sup>3</sup>/h et la puissance thermique exploitable de l'ordre de 10 MW (fig. 2).

L'eau chaude extraite du sous-sol par une pompe immergée dans le puits de production cède sa chaleur au réseau par l'intermé-

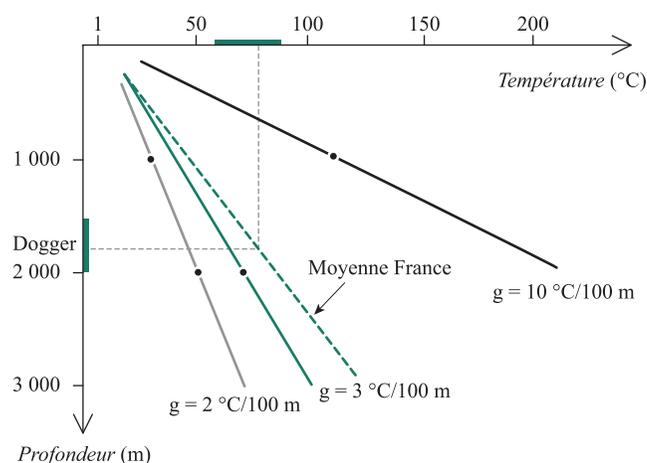


Fig. 1. Gradient géothermique

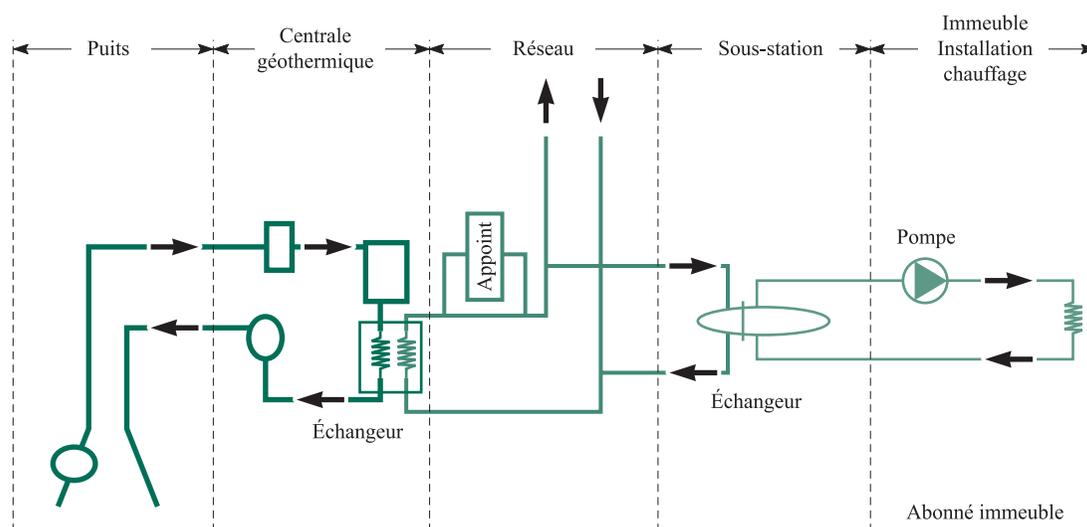


Fig. 2. Schéma d'une opération géothermique associée à un réseau de chaleur

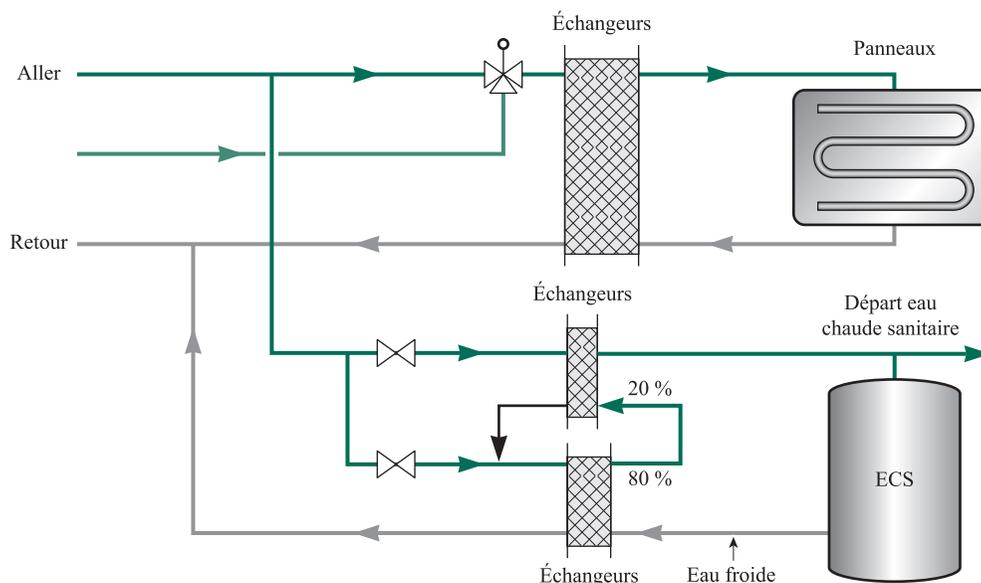


Fig. 3. Principe d'une sous-station fournissant chauffage et eau chaude sanitaire (source : J. Deslandes, Teta)

dière d'un échangeur, puis est réinjectée dans son aquifère d'origine par un puits de réinjection. Les tubages équipant les forages sont en acier ordinaire, l'échangeur est en titane pour résister à la corrosion.

La chaleur d'origine géothermique ne couvre généralement pas la totalité des besoins des utilisateurs raccordés ; un système d'appoint est nécessaire. Le réseau de distribution de chaleur aux usagers alimente les immeubles par des sous-stations qui remplacent les chaudières (fig. 3).

La puissance fournie par la géothermie ( $P_{\text{géoth}}$ ) est fonction de la température de retour du réseau, elle-même dépendante des émetteurs de chauffage. Une température de retour basse améliore la performance de l'opération. Des immeubles équipés de chauffage par le sol et bénéficiant d'une distribution d'eau chaude sanitaire collective sont les cibles les mieux adaptées à ce type d'opération.

$$P_{\text{géoth}} = 1,16 Q (T_p - T_r)$$

avec :

$P_{\text{géoth}}$  : puissance fournie par la géothermie (kW) ;

1,16 : chaleur spécifique de l'eau (°C) ;

$Q$  : débit du puits ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) ;

$T_p$  : température en tête de puits (°C) ;

$T_r$  : température de réinjection (après échange) (°C).

Les lois de régulation relatives aux émetteurs de chauffage sont déterminantes pour la détermination de la couverture des besoins par la géothermie. La figure 4 illustre bien l'intérêt de privilégier les émetteurs « basse température ».

Sur ce graphique, on constate par exemple qu'avec une température après échange de 65 °C, l'apport de la géothermie sera nul

Température des émetteurs (°C)

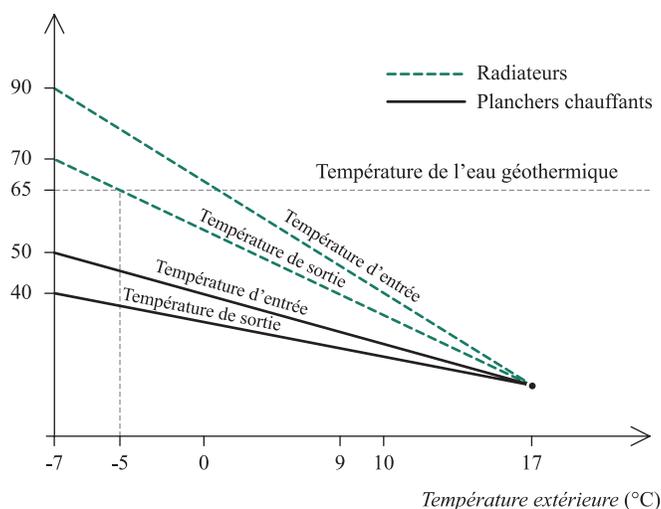


Fig. 4. Lois de régulation des émetteurs de chaleur

pour les températures les plus basses (entre -7 et -5 °C) si les ensembles à desservir sont équipés de radiateurs. Par contre, il n'y a pas de problème si les ensembles sont équipés de chauffage par le sol. On peut également remarquer que la température en sortie d'ensembles équipés de radiateurs est supérieure à celle nécessaire aux ensembles équipés de chauffage par le sol. Les ensembles équipés de panneaux de sol peuvent être mis en cascade derrière des ensembles équipés de radiateurs (fig. 5).

Le réseau de chaleur peut parcourir plusieurs kilomètres en milieu urbain dense et concerner 4 à 5 000 logements, voire plus (fig. 6).

31 réseaux de chaleur délivrent de la chaleur géothermique en Île-de-France. Ces réseaux sont nés d'une bonne conjonction entre une ressource disponible bien adaptée (aquifère du Dogger) et

des besoins importants en surface dans les zones d'urbanisation dense. L'Aquitaine dispose également d'une dizaine de réseaux de taille plus modeste, exploités à partir de puits uniques.

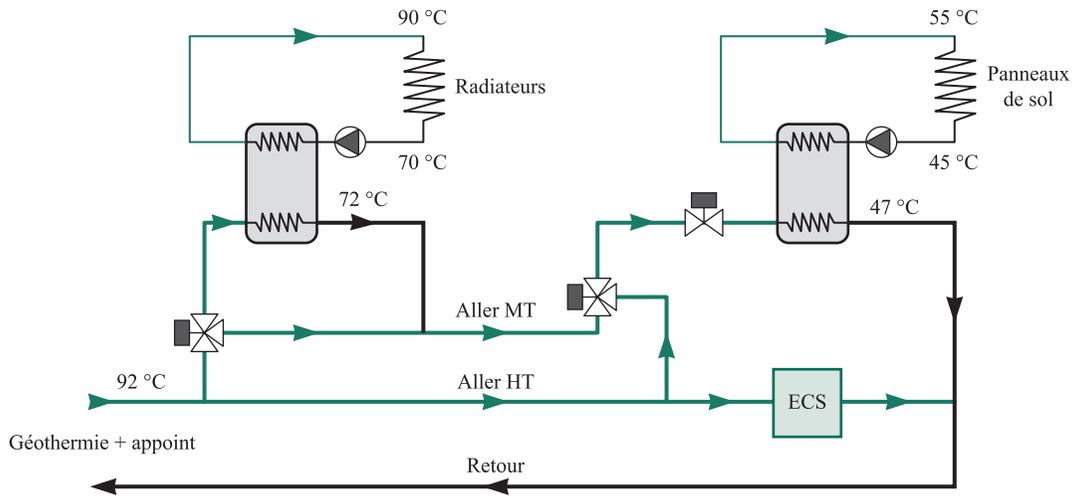


Fig. 5. Raccordement de deux sous-stations en cascade



Fig. 6. Localisation des opérations de géothermie profonde (région parisienne)

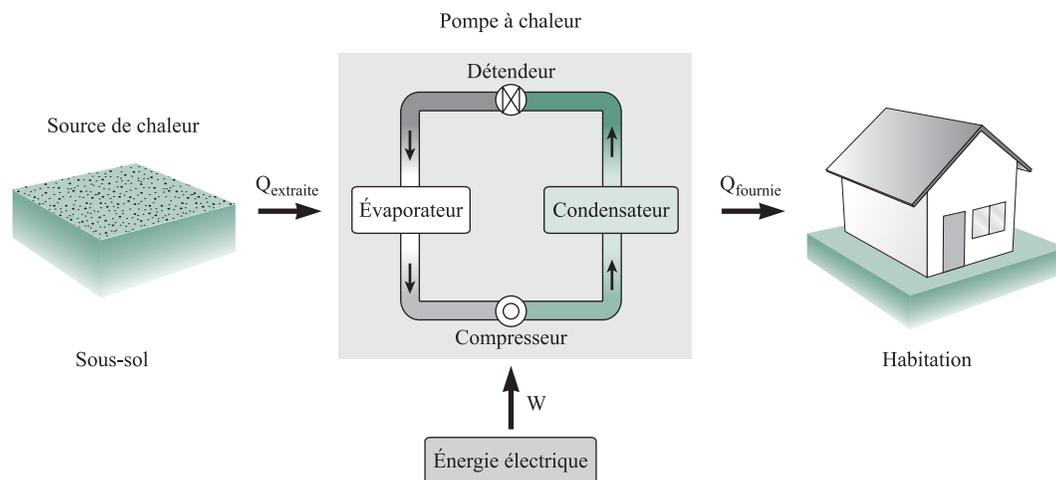


Fig. 7. Principe de la pompe à chaleur

## 3.2 Géothermie assistée par pompe à chaleur (PAC)

### 3.2.1 Pompe à chaleur (coefficient de performance)

Le principe de fonctionnement des pompes à chaleur est illustré sur la figure 7.

Le coefficient de performance (COP) est désigné par le rapport :

$$\text{COP} = \frac{\text{Énergie transférée par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment)}}{\text{Énergie consommée pour réaliser le transfert (compresseur et auxiliaires)}}$$

Il est dépendant de l'écart de température entre la température du milieu où sont prélevées les calories (sous-sol) et celle nécessaire pour chauffer l'habitation.

Le COP d'une pompe à chaleur indiqué par les fabricants est défini pour des températures d'essais déterminées ( $T^\circ$  de la source froide et  $T^\circ$  de la source chaude). Les pompes à chaleur sont testées suivant la méthode définie dans la norme NF EN 14511-1<sup>(1)</sup>. Ces tests sont réalisés par des centres d'essai indépendants.

Les performances de différents produits sont données sur le site Internet de Promotelec.

### 3.2.2 Pompe à chaleur sur aquifères peu profonds

À faible profondeur (< 100 m), de nombreuses régions disposent d'aquifères pouvant fournir des débits importants jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/h.

(1) NF EN 14511-1 (janvier 2008 – indice de classement : E38-116-1) : Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux – Partie 1 : termes et définitions.

Le site [www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr) met en ligne un outil d'aide à la décision pour l'installation de pompe à chaleur sur nappe aquifère, basé sur un système d'information géographique (SIG) sur le potentiel des aquifères superficiels (fig. 8). Les régions pour lesquelles ces données sont actuellement consultables sont l'Île-de-France, le Centre et la Lorraine.



Pour une étude de faisabilité, ces données ne remplacent pas celles fournies par un bureau d'études spécialisé.

Compte tenu du faible niveau de la température des aquifères peu profonds, une pompe à chaleur est nécessaire pour relever le niveau de température pour le chauffage. Avec une pompe à

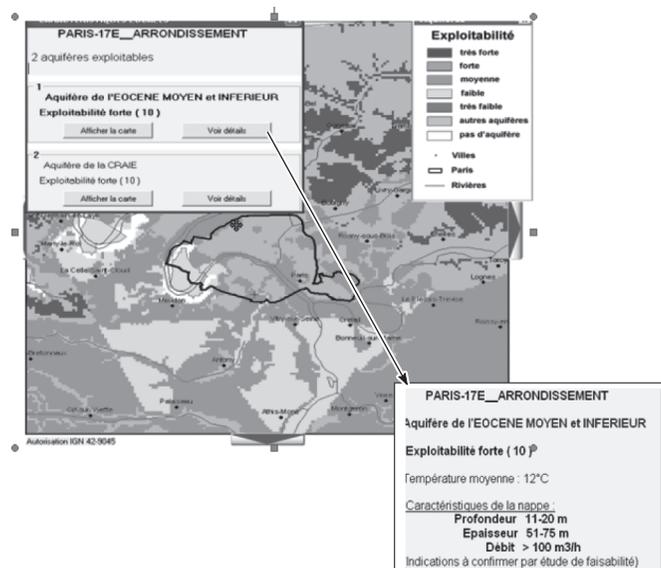


Fig. 8. Système d'information géographique

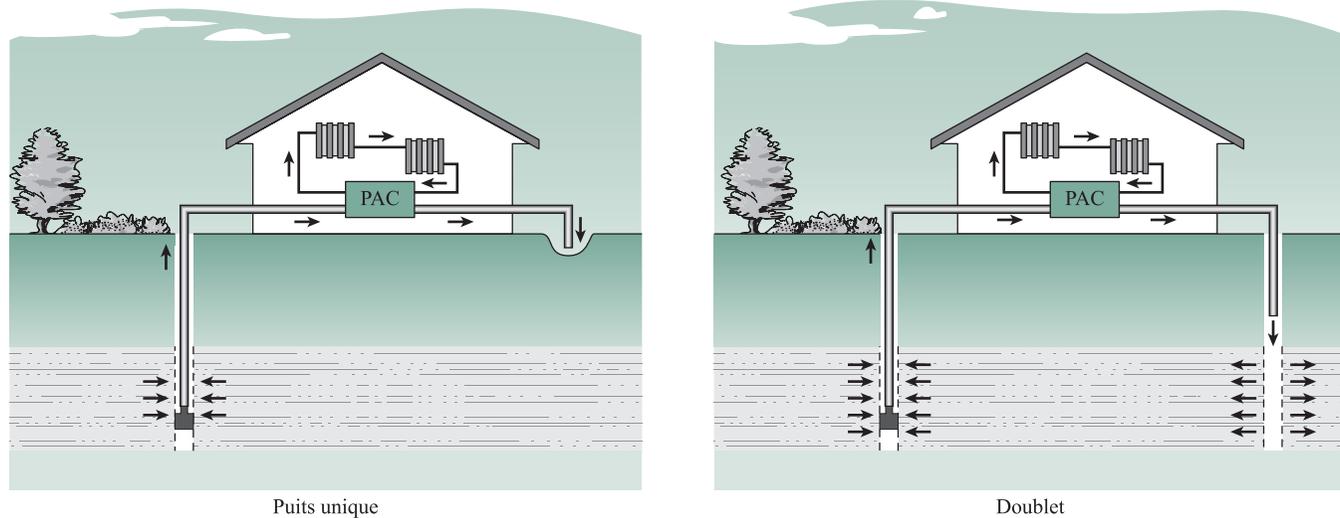


Fig. 9. Types de rejet

chaleur réversible, le même système peut également assurer les besoins de climatisation.

Une fois les calories prélevées, se pose le problème du rejet de l'eau dans des conditions environnementales satisfaisantes et de trouver un exutoire capable de recevoir les débits et les volumes utilisés. Deux voies sont envisageables : le rejet souterrain ou le rejet en surface (rivière, réseau pluvial...). Le rejet dans l'aquifère d'origine est généralement recommandé ; le rejet dans le réseau d'assainissement est à éviter (fig. 9).

### Fonctionnement en mode chauffage

En mode chauffage, l'eau est prélevée dans les nappes peu profondes à une température constante de l'ordre de 10 à 14 °C selon les sites exploités. Après son prélèvement au niveau de la pompe à chaleur, l'eau est rejetée à une température de l'ordre de 6 à 7 °C. À la sortie de la PAC, la température de l'eau nécessaire au chauffage du local est fixée par les émetteurs de chaleur mais excède rarement 60 °C. En mode chauffage, la puissance disponible sortie PAC est donnée par la formule :

$$P_{dispo} = (1,16 \times Q \times \Delta T) / (1 - 1/COP)$$

avec :

$P_{dispo}$  : puissance disponible (kW) ;

$Q$  : débit du puits (m<sup>3</sup>/h) ;

$\Delta T$  : écart de température entre production et réinjection (6 à 7 °C) ;

COP : coefficient de performance de la pompe à chaleur (fig. 10).

Pour un débit de 100 m<sup>3</sup>/h, la puissance disponible est de l'ordre de 1 000 kW et peut donc assurer le chauffage d'environ 400 logements aux normes RT 2005.

La pompe à chaleur est une machine thermodynamique réversible. En été, la production de froid peut être obtenue en inversant le cir-

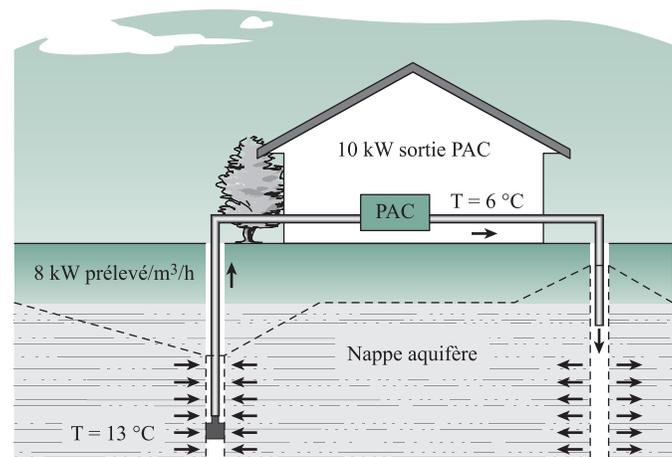


Fig. 10. Performance thermique d'une PAC sur aquifère (COP : 4)

cuit de la pompe à chaleur ; l'évaporateur devient condenseur et le condenseur devient évaporateur. En ce qui concerne les forages, soit l'on garde le même sens de circulation, soit on l'inverse : c'est le principe du puits chaud-puits froid (fig. 11).

Dans certains cas, notamment pour des locaux équipés de planchers chauffants-rafraîchissants, le rafraîchissement peut être obtenu directement à partir de l'eau de la nappe (après échange) sans passer par la PAC : c'est le géocooling.

En présence de besoins simultanés de chaud ou de froid, c'est le cas notamment des centres commerciaux, des cliniques, de certains immeubles de bureaux, la PAC est reliée à deux réseaux, l'un distribuant le chaud, l'autre le froid : c'est le principe de la thermofrigopompe. Ce montage permet les transferts thermiques grâce à la PAC, puisque lorsqu'il y a fourniture de froid, il y a production de chaud et vice et versa.

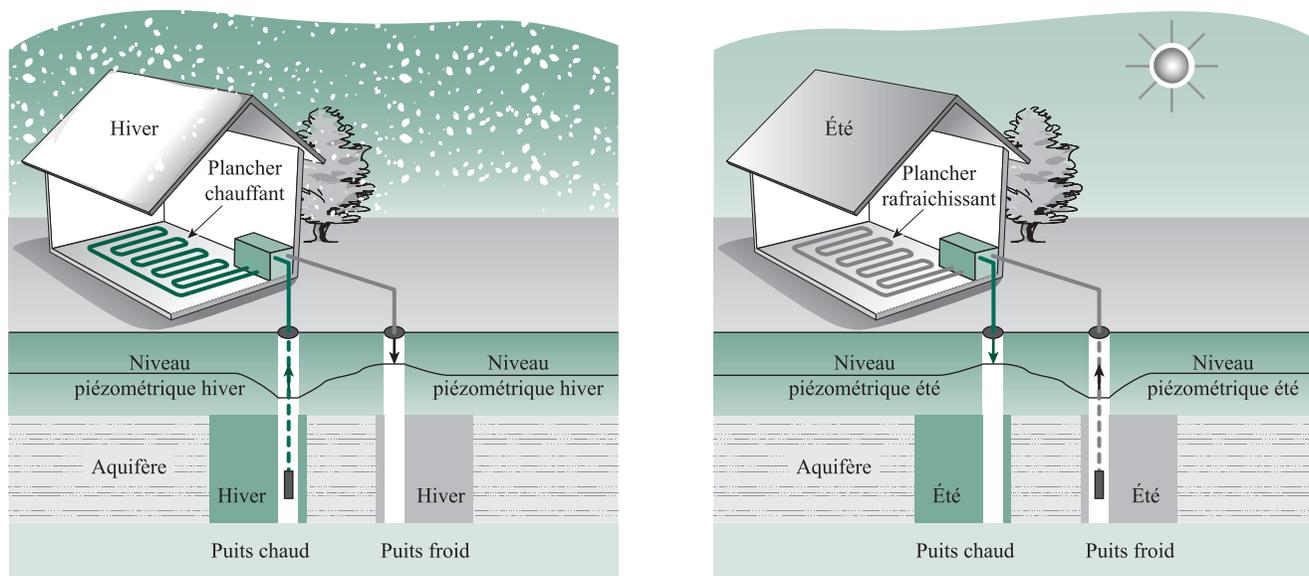


Fig. 11. Fonctionnement puits chaud-puits froid

### 3.2.3 Pompes à chaleur et échange avec le sol

#### Capteurs horizontaux

Cette technologie s'applique exclusivement aux maisons individuelles.

La technique consiste à positionner les capteurs dans le sol à une profondeur suffisante de 0,6 à 1,2 m. Les capteurs sont soit en polyéthylène haute densité (PEHD) et le fluide caloporteur est de l'eau glycolée, soit en cuivre lorsque le fluide frigorigène circule directement dans les capteurs (système à détente directe).

Les travaux à réaliser pour enfouir les capteurs consistent soit à décapier le terrain, soit à réaliser des tranchées.

La surface de terrain nécessaire est de l'ordre de 1,5 à 2 fois la surface à chauffer. La nature du terrain et son niveau d'humidité influent sur la capacité de prélèvement de chaleur dans le sous-sol : elle est par exemple de 20 W/m<sup>2</sup> dans un sol sablonneux et sec et de 70 W/m<sup>2</sup> dans un sol argileux saturé d'eau. À cette profondeur, les conditions climatiques influent sur la température du sous-sol. La recharge thermique du sous-sol est assurée par le biais du rayonnement solaire et de la pluviométrie. Ce système de captage est parfois appelé « géosolaire » (fig. 12).

Dans le système à détente directe, le fluide frigorigène circule directement dans les capteurs enterrés qui constituent en quelque sorte l'évaporateur de la pompe à chaleur. À l'intérieur de l'habitat, le fluide frigorigène circule dans la dalle chauffante et constitue le condenseur de la pompe à chaleur. Ce procédé, également désigné « PAC sol/sol », ne peut fonctionner qu'en mode chauffage et sans appoint.

Les systèmes à détente directe doivent bénéficier d'un avis technique à jour.

Compte tenu du pouvoir de réchauffement (PRG) particulièrement élevé des fluides frigorigènes (3 000 fois supérieur au CO<sub>2</sub>), toutes les dispositions doivent être prises pour éviter les fuites.

#### Capteurs verticaux

Le captage par échange avec le sol se fait généralement par l'intermédiaire d'un ou deux tubes en U descendus dans un forage vertical à des profondeurs allant de 30 à 200 m. Le capteur est inséré dans un forage de 132 à 165 mm de diamètre.

Les tubes en PEHD dans lesquels circule de l'eau glycolée ont d'un diamètre compris entre 25 et 40 mm. Le forage est ensuite rempli avec un mélange de ciment et de bentonite qui stabilise le trou dans sa géométrie originelle (fig. 13).

La profondeur des sondes géothermiques permet de s'affranchir des variations de température journalières et saisonnières, et d'exploiter les pompes à chaleur dans de bonnes conditions en hiver, même quand la température de l'air extérieur est très basse.

Les capteurs verticaux ont une emprise au sol réduite. Ils peuvent être utilisés pour les maisons individuelles (1 à 2 forages) ou développés en champ de sondes pour desservir des ensembles plus importants tels que des petits collectifs, des équipements tertiaires, etc. (fig. 14).

Pour les ensembles importants nécessitant plusieurs forages (champ de sondes), il est conseillé d'optimiser le nombre de sondes en commençant par la réalisation d'un test de réponse thermique sur le premier forage. Ce test permet de définir le nombre exact de sondes à mettre en place.

L'espacement et la disposition relative entre les sondes influent sur la température du sol dans le temps. Plus les sondes sont rapprochées, plus la température du sol va diminuer avec les années.

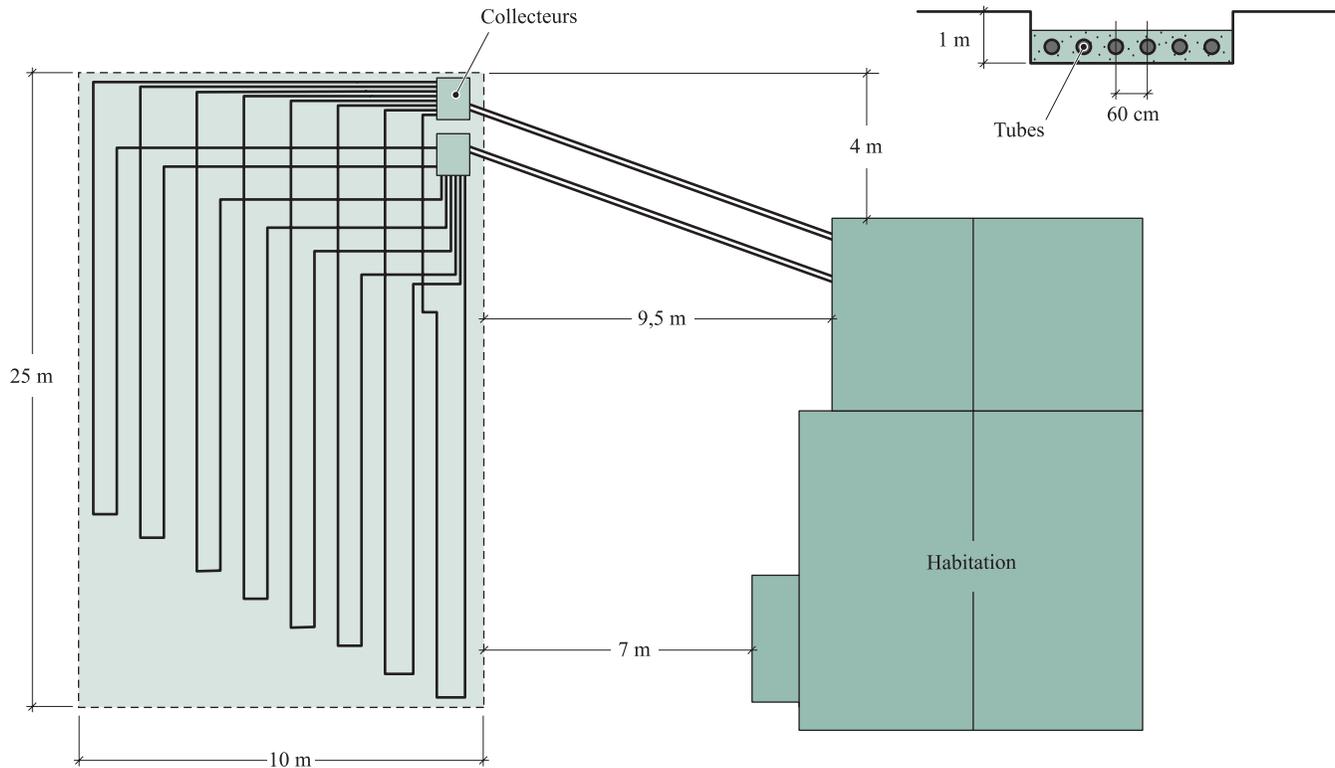


Fig. 12. Exemple de plan de captage

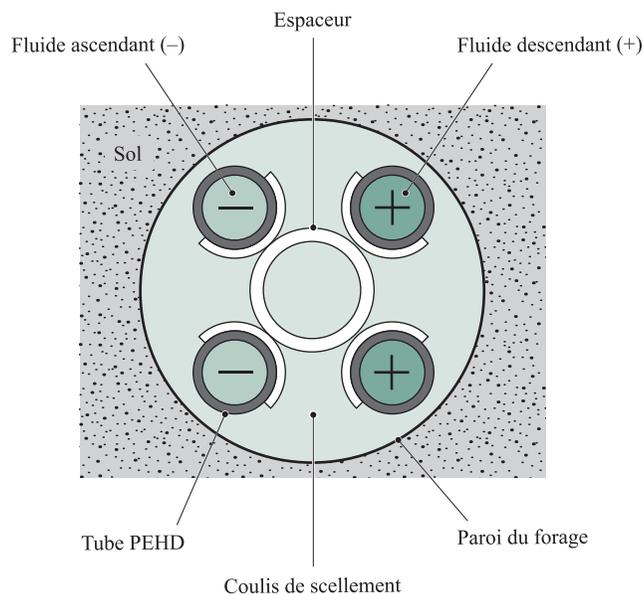


Fig. 13. Coupe d'un capteur vertical

Ce phénomène de refroidissement est atténué lorsqu'on utilise la réversibilité pour le rafraîchissement l'été, générant ainsi une recharge thermique du sous-sol.

Pour limiter les interférences thermiques des sondes les unes par rapport aux autres, il est recommandé, en fonction de la nature du sol rencontré, de respecter une distance minimale entre sondes de 7 à 10 m. La figure 15 montre différentes dispositions possibles de capteurs permettant au sol de se régénérer dans des conditions satisfaisantes.

Une disposition en ligne ou en équerre offre moins d'interférences qu'une disposition groupée notamment en matrice à plusieurs rangées de capteurs.

Pour le dimensionnement, deux options sont possibles :

- assurer la totalité de la puissance et des besoins ;
- assurer partiellement les besoins et prévoir un système d'appoint. Pour 50 % de la puissance maximale nécessaire, la couverture des besoins est généralement de plus de 80 %, et l'investissement en sous-sol est divisé par deux.

Une fois l'opération réalisée, le fluide circulant en circuit fermé, les coûts d'exploitation sont réduits et nettement inférieurs à une solution de PAC sur aquifère, pour laquelle il faut intégrer l'entretien du puits et de la pompe immergée, etc.

### 3.2.4 Fondations géothermiques ou thermoactives

Leur principe consiste à installer dans les fondations (dalles, parois, pieux) un réseau de tubes dans lequel on fait circuler un

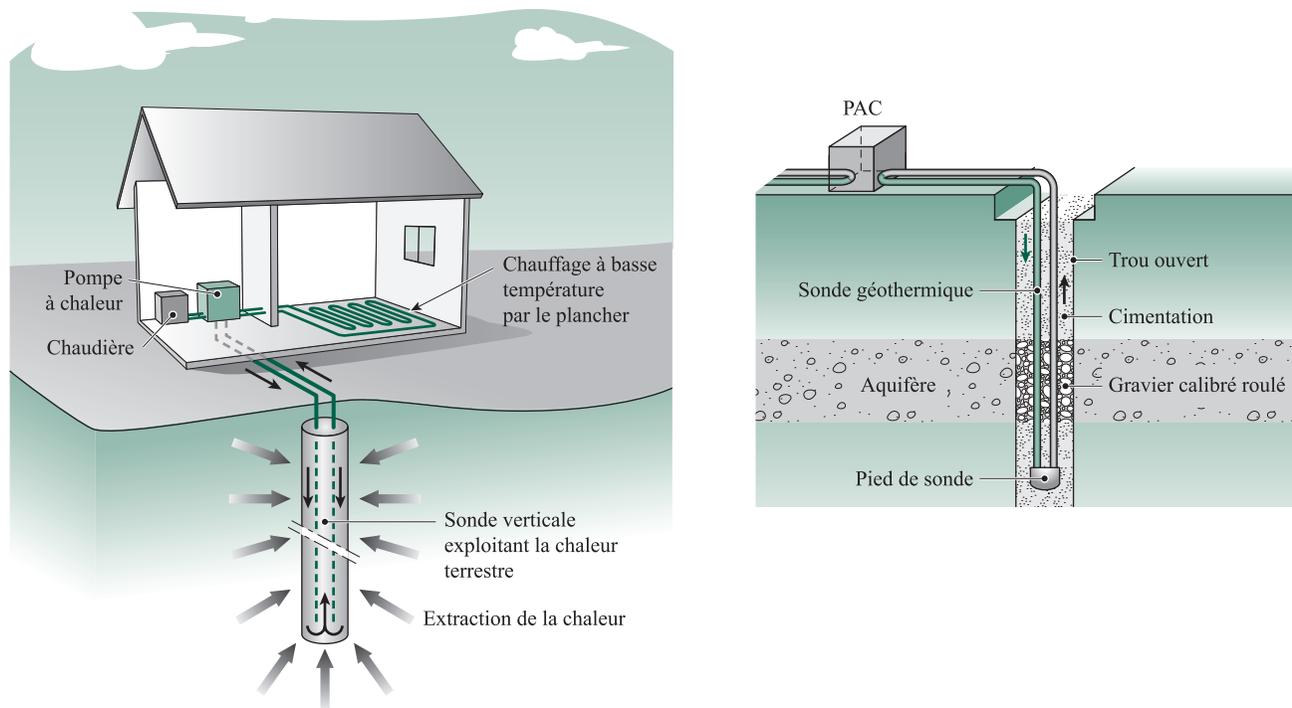


Fig. 14. Sonde verticale appliquée à une maison individuelle

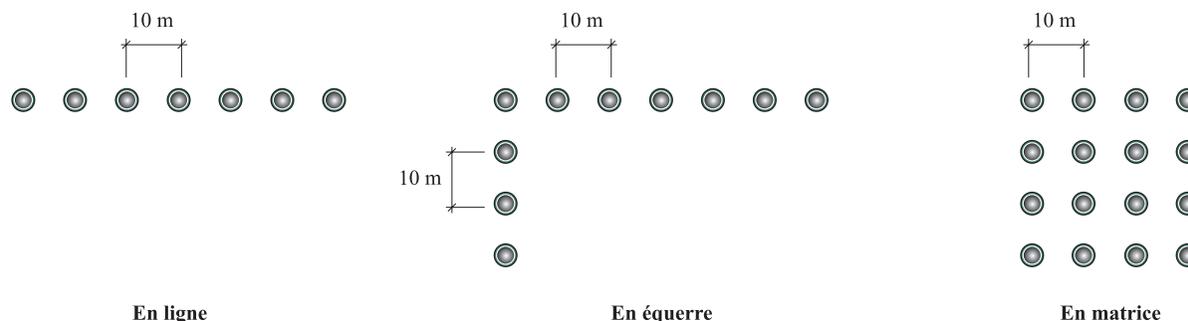


Fig. 15. Disposition des sondes

fluide caloporteur pour échanger l'énergie thermique avec le terrain (fig. 16, fig. 17).

Cette technique, qui permet d'assurer des besoins de chauffage et de rafraîchissement, s'est surtout développée en Autriche et en Suisse. Quelques exemples récents ont été réalisés en France.

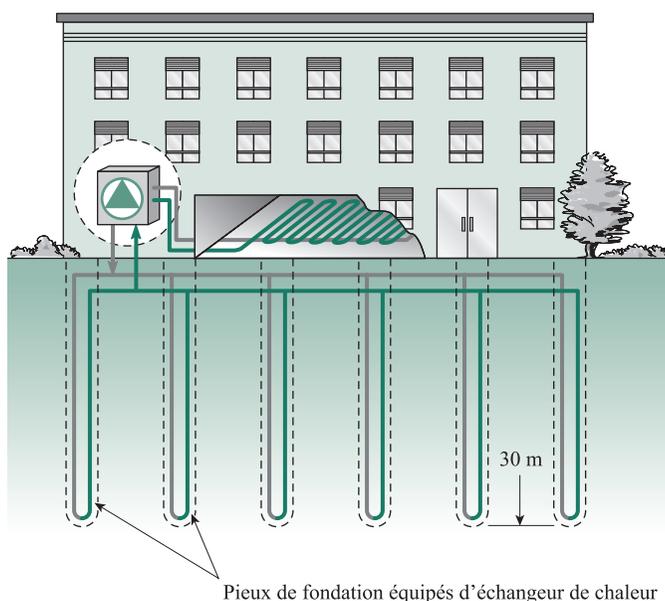
### 3.2.5 Puits canadien

Le **puits canadien**, appelé aussi **puits provençal**, est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sous-sol à une

profondeur limitée de 2 à 3 m. Le principe consiste à faire circuler à vitesse faible, dans des canalisations étanches enterrées, l'air destiné au renouvellement de l'ambiance intérieure des locaux.

Ce système sert pour le préchauffage de l'air en hiver et pour le rafraîchissement en été. Il est fondé sur le simple constat que la température à 2 m de profondeur est à peu près constante : environ 12 °C l'été et 7 °C l'hiver.

Le puits canadien s'appuie sur le principe de la différence entre la température du sous-sol et la température de l'air extérieur (fig. 18, fig. 19).



Pieux de fondation équipés d'échangeur de chaleur

Fig. 16. Principe des fondations géothermiques

## 4 Aspects réglementaires

L'exploitation des eaux souterraines par forages et l'exploitation des calories du sous-sol sont soumises au Code minier, au Code de l'environnement (loi sur l'eau) et au Code de la santé publique. Des dispositions spécifiques peuvent concerner certaines régions.

### 4.1 Code Minier

La chaleur du sous-sol est considérée comme une substance minière.

Les forages sont soumis au régime d'autorisation ou de déclaration dès que la profondeur dépasse 10 m ou que le débit dépasse  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'autorisation est nécessaire si l'un des critères suivants est obtenu :

- prélèvement annuel  $> 200\,000 \text{ m}^3$  ;
- débit de réinjection  $> 80 \text{ m}^3/\text{h}$  ;
- profondeur  $> 80 \text{ m}$  (cas de l'Île-de-France).

L'exploitation des gîtes géothermiques soumis à autorisation est assujettie à l'obtention d'un permis d'exploitation minier accordé par le préfet après enquête publique. Avant de commencer les travaux, il est nécessaire d'obtenir :

- une autorisation de recherche ;
- une autorisation d'exploitation ;
- une autorisation de forage.

### 4.2 Code de l'environnement (loi sur l'eau)

#### Usage non domestique

À partir de  $1\,000 \text{ m}^3/\text{an}$  d'eau prélevée (avec ou sans réinjection), les opérations sont soumises à déclaration ou à autorisation au titre de la loi sur l'eau.

Les prélèvements sont soumis à :

- autorisation si le volume total prélevé est  $\geq 200\,000 \text{ m}^3/\text{an}$  ;
- déclaration si le volume total prélevé est  $> 10\,000 \text{ m}^3/\text{an}$  mais  $< 200\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ .

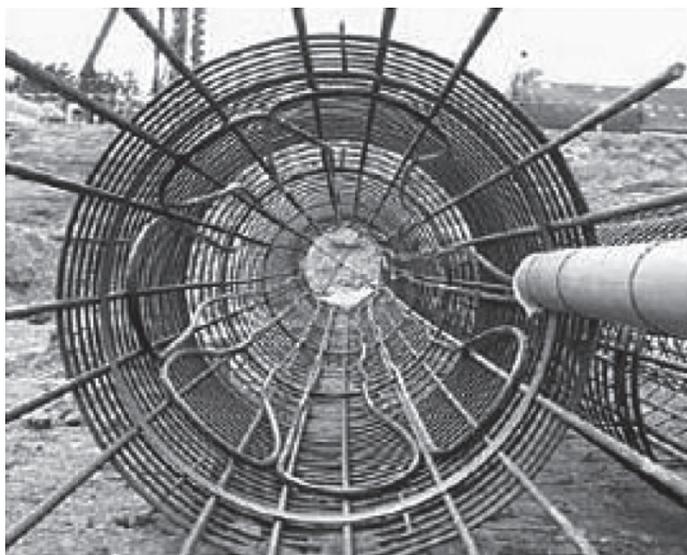


Fig. 17. Cage d'armature de pieux équipée de capteurs



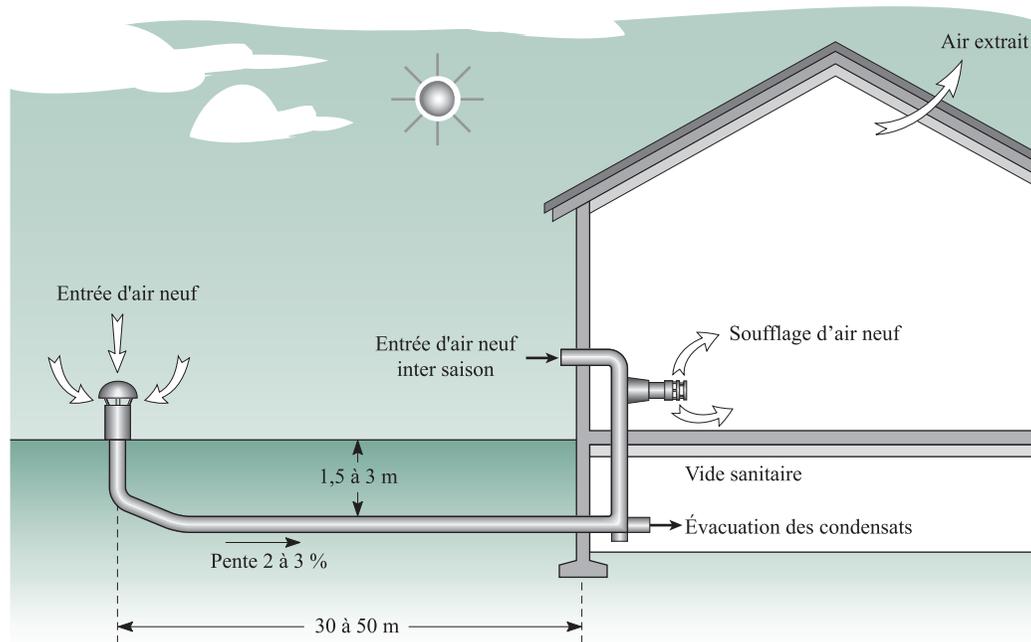


Fig. 18. Schéma simplifié d'un puits canadien



Fig. 19. Implantation des canalisations avant terrassement (source : Canada Clim)

La réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie est soumise à :

- autorisation si la capacité totale de réinjection est  $\geq 80 \text{ m}^3/\text{h}$  ;
- déclaration si la capacité totale de réinjection est  $> 8 \text{ m}^3/\text{h}$  mais  $< 80 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 4.3 Code de la santé publique

Ce code s'applique dans le cas particulier où les eaux du forage géothermique seraient utilisées également pour l'alimentation en eau potable ou dans l'industrie agroalimentaire.

La distribution de l'eau à usage alimentaire est soumise à autorisation ou à déclaration au titre du Code de la santé publique (art. L. 1321-1 à L. 1321-10).

## 5 Mesures incitatives

### 5.1 Couverture des risques géologiques

Les pouvoirs publics ont mis en place un système de couverture des risques géologiques pour les opérations sur aquifères, comportant 2 volets :

- une garantie à court terme couvrant le risque de ne pas trouver les caractéristiques escomptées lors de la réalisation des forages ;
- une garantie de pérennité destinée à se prémunir des risques géologiques (baisse de débit par exemple) pouvant survenir au cours de l'exploitation.

La gestion de ces dispositifs est assurée par la Société auxiliaire de financement de l'environnement (SAF Environnement) sous l'égide de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

## 5.2 Aides financières

Le fonds chaleur mis en place suite au Grenelle de l'environnement prévoit des modalités d'aides pour les opérations de géothermie et pour les réseaux de chaleur utilisant cette énergie. Le montant des aides n'est pas arrêté de manière définitive.

Le principe régissant le calcul des aides sera de permettre à la chaleur renouvelable d'être vendue à un prix inférieur d'au moins 5 % à celui de la chaleur produite à partir d'énergie conventionnelle. En fonction de la rentabilité intrinsèque du projet l'aide pourra atteindre jusqu'à 60 % des dépenses éligibles.

## 6 Réalisations concrètes

### 6.1 Géothermie profonde : réseau de Chevilly-Larue–L'Haÿ-les-Roses

Couvrant à l'origine les communes de Chevilly-Larue et de L'Haÿ-les-Roses (Val-de-Marne), le réseau s'est par la suite

étendu sur la commune de Villejuif. Il alimente environ 22 000 équivalents-logements, soit plus de 90 % des logements collectifs et équipements publics des communes de Chevilly-Larue et L'Haÿ-les-Roses (fig. 20).

Les principales caractéristiques du réseau sont :

- 2 doublets à 1 800 m ; température : 73 à 75 °C ; débit maximal : 300 m<sup>3</sup>/h ;
- 80 km de canalisations (réseau 3 tubes) ;
- production géothermique : 98 000 MWh ;
- appoint par cogénération gaz : 54 000 MWh.

### 6.2 Pieux géothermiques : petit immeuble parisien

Cette opération exemplaire concerne un petit immeuble parisien de 4 étages, dont la construction nécessitait la mise en place de pieux en raison de la structure du sous-sol. Le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement d'été sont assurés par une pompe à chaleur avec captage géothermique vertical. Les capteurs géothermiques sont placés à l'intérieur de 9 pieux de 50 cm de diamètre et de 15 m de profondeur, ce qui permet d'apporter approximativement une puissance de 6,7 kW<sup>(2)</sup> (fig. 21).

En été, la pompe à chaleur n'est pas inversée et continue à produire de la chaleur (de façon intermittente) pour l'eau chaude sanitaire. Un puisage sur le circuit de retour de la géothermie permet d'alimenter un deuxième échangeur (batterie froide) dans la ventilation double flux et de rafraîchir l'air.

(2) Capacité d'absorption calorifique d'un capteur vertical estimé à 50 W/m linéaire.

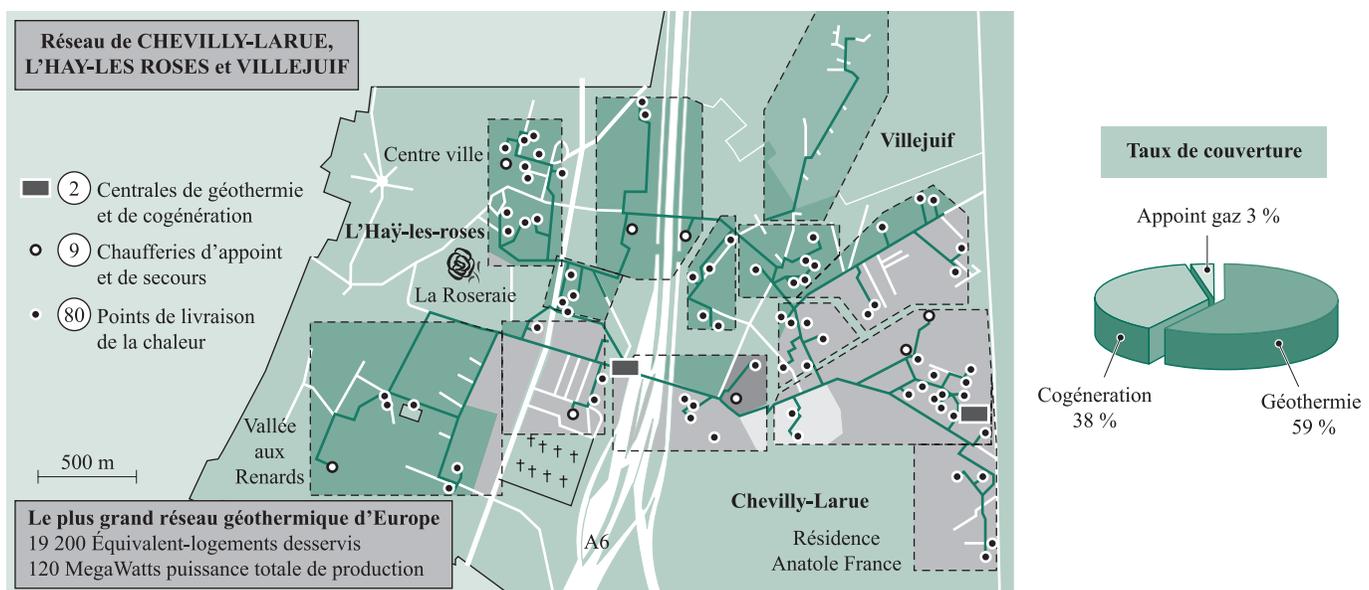


Fig. 20. Réseau de chaleur géothermique de Chevilly-Larue–L'Haÿ-les-Roses

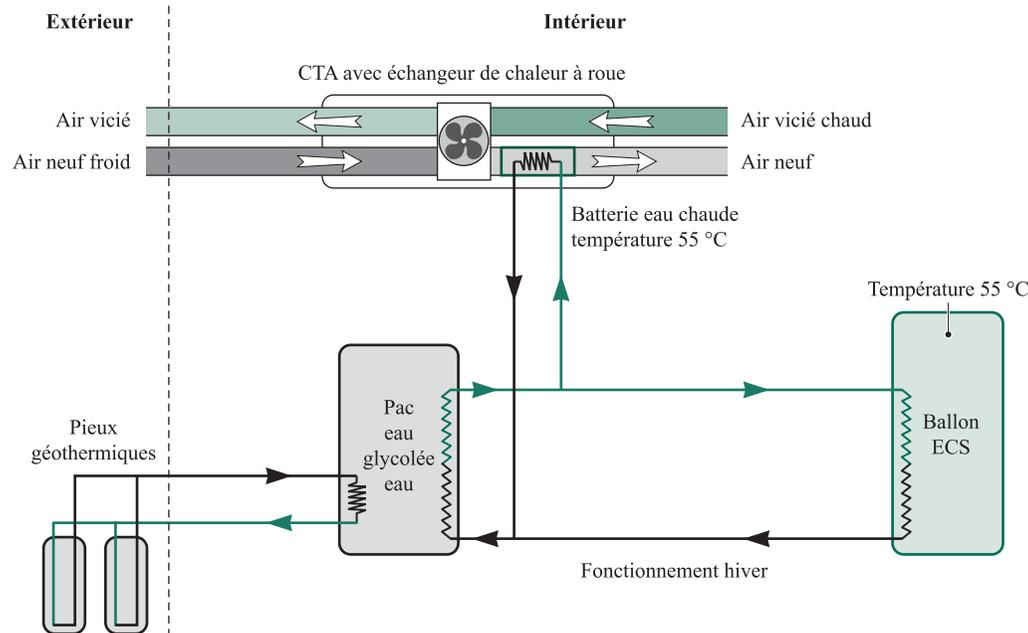


Fig. 21. Schéma de principe du fonctionnement hivernal de chauffage et de production d'ECS (source : bureau d'études thermiques S2T, Suresnes)

## 7 Conclusion

La géothermie profonde a atteint un stade de maturité. Les opérations réalisées dans les années 80 ont réglé leurs problèmes de jeunesse et n'ont cessé au cours du temps de se développer et d'optimiser les conditions d'exploitation. Un redémarrage de ce type d'opération est engagé, après l'opération réalisée à Paris en 2009 pour desservir 12 000 logements autour de la porte d'Auber-villiers. D'autres réalisations importantes sont annoncées (Orly Aéroport de Paris, Marne la Vallée...).

En ce qui concerne les systèmes géothermiques assistés par pompe à chaleur, la palette des applications et des techniques est très vaste. Une partie du champ des investigations reste encore à découvrir, notamment dans la combinaison de la production de chaud et de froid alternée ou simultanée (thermofrigopompe), ainsi que pour les techniques de géocooling, de stockage...



### En savoir plus

- Géothermie perspectives (Ademe, BRGM) : [www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)
- Semhach-energie renouvelable : Réseau géothermie, chauffage urbain... : [www.semhach.fr](http://www.semhach.fr)

## 8 Bibliographie

- Lemale J., *La Géothermie*, Éditions Dunod/Ademe/Le Moniteur, 2009.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie*, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2008.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface*, Éditions Techniques de l'Ingénieur, à paraître.
- Lemale J., Jaudin F., *La géothermie, une énergie d'avenir*, Éditions Arene, 1998.
- Bernier J., *Chauffage (et rafraîchissement) par pompe à chaleur. Déterminer, installer, entretenir*, Éditions PYC Livres, 2007.
- *Guide technique – Pompe à chaleur géothermique sur aquifère. Conception et mise en œuvre*, Ademe/Arene/BRGM, 2008.
- *La géothermie : Quelles technologies pour quels usages ?*, Ademe/BRGM, 2008.