



Guide technique

Pompe à chaleur géothermique sur aquifère

Conception et mise en œuvre

Cas de l'Ile-de-France



Manuel co-édité
par l'ADEME, l'ARENE, le BRGM et EDF

ÉDITION FÉVRIER 2008

Rédacteurs :

Jean Lemale (expert), Daniel Gourmez (Alto).

Avec la collaboration de :

Mohamed Amjahdi, Norbert Bommensatt, Philippe Laplaige (ADEME) ;
Marie-Laure Falque-Masset (ARENE Ile-de-France) ; Alain Desplan, Pascal Monnot (BRGM) ;
Florent Sovignet (DRIRE Ile-de-France) et José Naveteur (EDF).

Réalisation :

BL Communication

En couverture : pompe à chaleur sur aquifère, pôle administratif de la ville des Mureaux (78)

Ce document s'adresse aux maîtres d'ouvrage publics ou privés et à leurs conseils, aux bureaux d'études sous-sol et thermiques, aux entreprises de forage et en général à tous les acteurs de la filière pompe à chaleur (PAC) géothermique. Il a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une démarche visant à développer ou réaliser une opération mettant en œuvre des pompes à chaleur géothermiques sur aquifère.

Les principes et analyses développés dans ce document s'appliquent également pour l'essentiel aux pompes à chaleur utilisant des capteurs enterrés (sondes géothermiques, champs de sondes, fondations géothermiques, etc.) pour prélever par simple échange l'énergie contenue dans les terrains (voir annexe 3, page 68).

L'utilisation de systèmes thermodynamiques pour assurer soit le chauffage seul, soit le chauffage et le rafraîchissement de locaux, est un procédé plus complexe que les procédés traditionnels de chauffage mais plus performant. Ses principaux avantages portent sur la « gratuité » de la ressource géothermale et la possibilité de produire de la chaleur et/ou du froid.

Les pompes à chaleur (PAC) sur aquifère ont par ailleurs la particularité d'associer deux secteurs d'activité qui n'ont a priori rien à voir : l'hydrogéologie et le génie climatique. Le développement de cette technologie doit gérer la mise en adéquation entre d'une part la ressource géothermale dont la température est imposée, et à peu près constante dans le cas des aquifères superficiels, et d'autre part des bâtiments dont les besoins énergétiques sont également fixés ; les principaux éléments variants sont donc le débit pompé, la puissance thermique appelée et, dans le cas de bâtiments, les courbes de régulation (loi d'eau).

Malgré ces contraintes spécifiques, il n'en demeure pas moins vrai que la pompe à chaleur sur aquifère est une technique qui présente des atouts indiscutables, en termes de maîtrise de l'énergie, de protection de l'environnement et d'intégration architecturale. Les pompes à chaleur dites « réversibles » qui assurent cette double fourniture sont particulièrement adaptées aux bâtiments du secteur tertiaire où les besoins en rafraîchissement sont souvent indispensables.

Le secteur tertiaire est important en Ile-de-France et le développement des PAC réversibles associées à des forages constitue une solution qu'il est important d'examiner à l'occasion de programmes neufs ou de réhabilitation. L'Ile-de-France offre l'avantage de receler sur l'essentiel de son territoire des aquifères de bonne qualité pouvant servir de source de chaleur ou de rafraîchissement.

À partir de cartes d'inventaire des aquifères existants et de leurs caractéristiques, le BRGM a élaboré, dans le cadre d'un partenariat avec l'ADEME, l'ARENE et EDF un système d'informations géographiques (SIG). Cet outil permet d'indiquer, pour un endroit donné, si le débit qu'il est possible de soutirer grâce à l'installation de pompes à chaleur permet d'envisager le chauffage de locaux par PAC.

Cet outil d'aide à la décision concerne tout particulièrement les maîtres d'ouvrage, les architectes, les bureaux d'étude, les industriels, les particuliers et les décideurs publics. Ce système d'informations pour la région Ile-de-France est consultable sur l'espace régional du site :

<http://www.geothermie-perspectives.fr>

La filière pompe à chaleur sur aquifères nécessite que les installations soient conçues, réalisées et entretenues dans les règles de l'art par des professionnels compétents tant dans les domaines des installations de sous-sol, que des installations de surface. Ce guide a pour objet de rappeler les grands principes de mise en œuvre de ces installations.

Principes relatifs aux pompes à chaleur

Principes thermodynamiques.....	06
Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC à compression)	07

Caractéristiques des aquifères superficiels

Définitions	18
Paramètres liés au réservoir (porosité, perméabilité- transmissivité).....	18
Paramètres liés au fluide (chimie, bactériologie).....	20
Caractéristiques des aquifères superficiels de l'Ile-de-France	21

Éléments constitutifs d'un système thermodynamique

La source froide (air, sol, eau).....	10
Pompes à chaleur à compression.....	11
Pompes à chaleur à absorption	12
La source chaude (milieu à chauffer, systèmes d'émissions hydraulique, aéraulique).....	13
Mises en œuvre particulières (pompe à chaleur réversible, fonctionnement en thermo-frigopompe) ..	14
Coefficients de performance (COP) de la PAC	15
Les différents types de fluides frigorigènes.....	16

Détermination des besoins

Besoins de chaud	24
Besoins de froid	26
Fourniture d'eau chaude sanitaire (ECS)	26

Adéquation ressource géothermale - besoins thermiques

Principes	28
Mode de fonctionnement hivernal (chauffage).....	28
Mode de fonctionnement estival (rafraîchissement) ..	29
Schémas de montage.....	31
Pompe à chaleur réversible	31
Thermofrigopompe.....	32
Pompe à chaleur sur boucle d'eau froide	33
Bilan énergétique.....	34

Mise en œuvre d'une solution PAC sur aquifère

Outil d'aide à la décision pour l'installation de PAC sur aquifère : l'exemple de l'Île-de-France.....	36
Principales caractéristiques de l'aquifère	36
Analyse hydrogéologique du site.....	36
Techniques de forages	37
Configuration générale des ouvrages	38
Équipements du forage	38
Développement et essais	41
Conditions de rejet des eaux.....	42
Analyse comportementale de la nappe.....	42

Exploitation et maintenance

Surveillance et entretien des installations de surface (pompe à chaleur)	44
Surveillance et entretien des ouvrages de sous-sol (forage, équipements d'exploitation)	45

Montage administratif, juridique et financier

Aspects réglementaires.....	48
Le code minier	48
Le code de l'environnement (loi sur l'eau).....	49
Le code de l'environnement (installations classées)...	50
Le code de la santé publique	51
Procédures incitatives (Aquapac, aléas, garantie de recherche, pérennité, mécanismes financiers, crédit d'impôt, autres mécanismes financiers).....	51

Aspects économiques et environnementaux

Aspects économiques : Investissements	54
Études et maîtrise d'œuvre	54
Forages et équipements (travaux, maintenance)	54
Équipements de surface (pompe à chaleur, distribution, émetteurs, maintenance, redevance)	55
Analyse comparative avec les solutions traditionnelles	56
Aspects environnementaux	57
Énergie du sous-sol : une énergie renouvelable	57
Émissions de CO ₂ et taux démission	57
Impact des fluides frigorigènes	57

Domaines d'applications appropriés

Principes généraux	60
Centre commerciaux / Hypermarchés	60
Cliniques/hôpitaux	61
Immeubles de bureaux	62
Logements	63
Lotissements sur boucle d'eau	63
Couplage habitations commerces	64
Patinoire	64
Autres utilisations	64
Stockage intersaisonnier	64
Héligéothermie	64
Stockage à partir de serres horticoles	64

Annexes

Déroulement d'une opération de Géothermie PAC sur aquifère	66
Cahier des charges d'études de faisabilité d'une opération de géothermie PAC sur aquifère	67
Capteurs géothermiques verticaux	68
Pour en savoir plus	69

Lexique

Lexique	70
---------------	----

Ce qu'il faut retenir

Points à retenir pour l'installation d'une PAC géothermique sur aquifère	72
--	----

Principes généraux relatifs aux pompes à chaleur

Principes thermodynamiques.....	06
Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC à compression).....	07



Principes généraux relatifs aux pompes à chaleur

PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

Le principe de la pompe à chaleur (PAC) est connu depuis longtemps, si l'on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot (1824), qui a établi l'équivalence du travail et de la chaleur.

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude, donc à un niveau de température supérieur. Ce transfert se fait via un fluide caloporteur (fluide frigorigène) et ne peut se réaliser que s'il y a apport d'énergie sous forme de travail (dans le cas de PAC à compression).

SI L'ON DÉSIGNE PAR :

Q_o : quantité de chaleur prélevée dans la source froide

Q_c : quantité de chaleur restituée au niveau de la source chaude

W : énergie mécanique ou électrique apportée au système

T_o : température d'évaporation à la source froide en Kelvin (évaporateur)

$$\text{soit } T_o = t_o + 273,15 \text{ si } t_o$$

t_o : température en degré Celsius de la source froide

T_c : température de condensation à la source chaude en Kelvin (condenseur)

$$\text{soit } T_c = t_c + 273,15 \text{ si } t_c$$

t_c : température en degré Celsius de la source chaude

On peut écrire d'après le premier principe de Carnot l'égalité suivante :

$$Q_c = Q_o + W$$

On définit un coefficient de performance théorique (**COP**) qui est le rapport de la quantité d'énergie transmise à la source chaude (Q_c) par la quantité d'énergie mécanique dépensée (W) donc :

$$\text{COP chaud} = \frac{Q_c}{W}$$

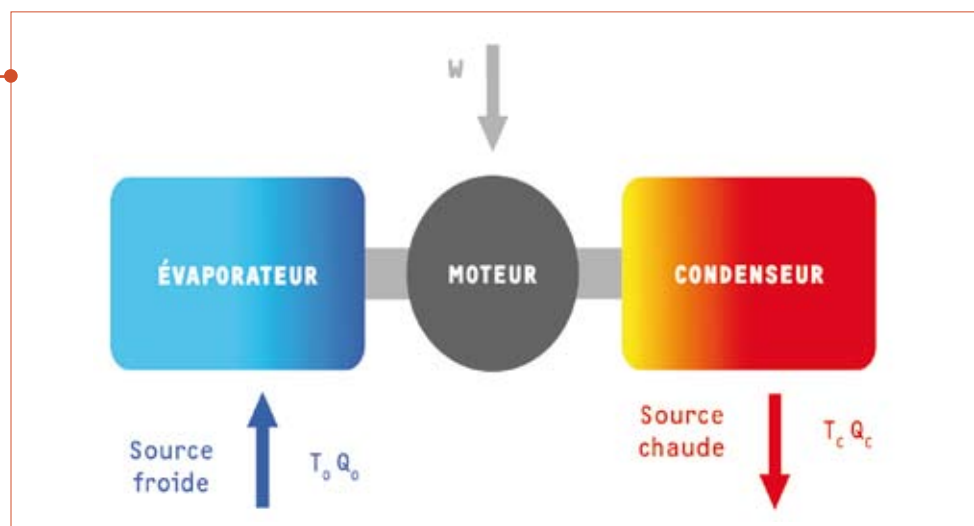
En application du deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$\text{COP} = \frac{T_c}{(T_c - T_o)}$$

On peut également en déduire un coefficient de réfrigération (C_R), rapport de la chaleur absorbée à l'évaporateur à l'énergie reçue au compresseur.

$$C_R = \frac{Q_o}{W}$$

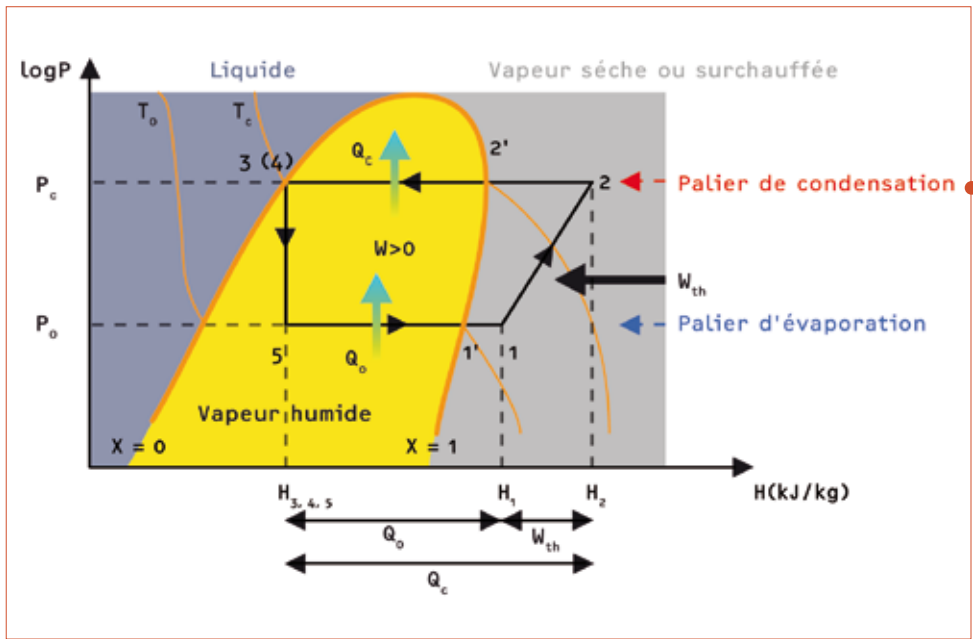
Schéma de principe d'une machine thermodynamique



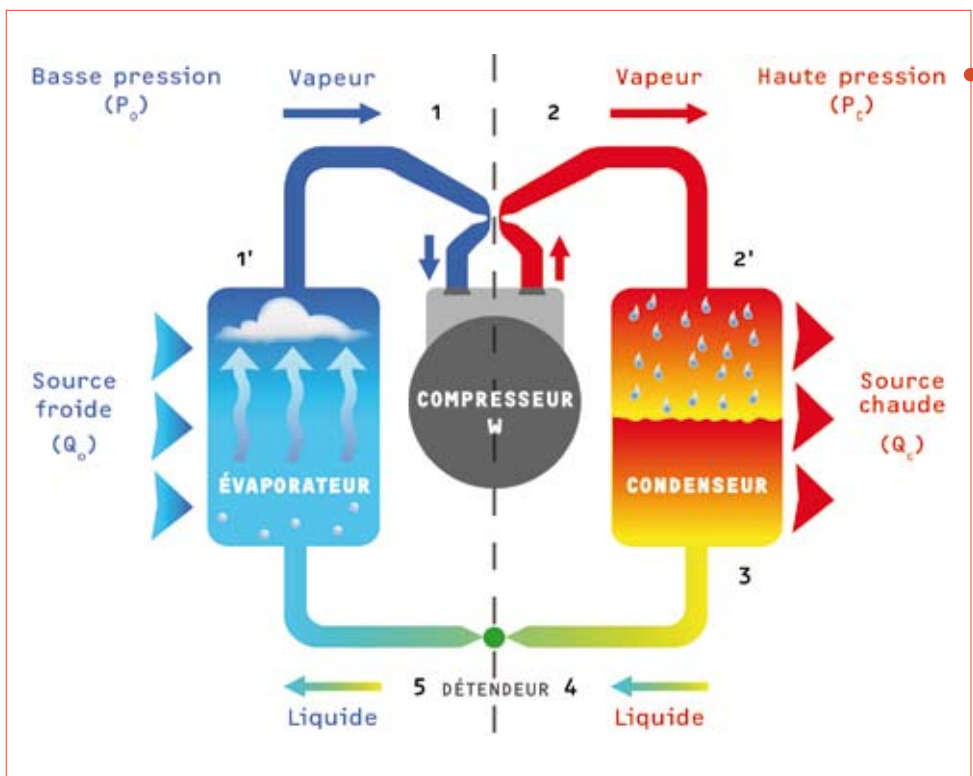
PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE À CHALEUR (PAC À COMPRESSION)

Il existe deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption (présentées à la page 12) qui sont beaucoup moins diffusées que celles à compression. Les éléments généraux ci-après ne concernent donc que les PAC à compression.

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau...) est captée par le fluide caloporteur (à faible point d'ébullition) au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer. La température de ce dernier s'abaisse fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.



Le diagramme dit de Mollier (ici pour une PAC à compression) permet de suivre l'évolution du cycle thermodynamique idéal du fluide qui circule dans la pompe à chaleur à compression



Principe de fonctionnement d'une PAC à compression.

On note dès à présent l'importance que revêtira la nature des émetteurs de chauffage pour l'efficacité du système thermodynamique appliqué au chauffage.

On vérifie ainsi le premier principe de Carnot sur l'échelle en abscisse, car on constate que :

- la quantité de chaleur dégagée au condenseur :

$$Q_c = H_2 - H_4$$

- la quantité de froid produite à l'évaporateur :

$$Q_o = H_1 - H_5$$

- le travail dépensé au compresseur :

$$W_{th} = H_2 - H_1$$

En application du deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$COP = \frac{T_c}{(T_c - T_o)}$$

Sur le diagramme de Mollier :

$$COP = \frac{(H_2 - H_4)}{(H_2 - H_1)}$$

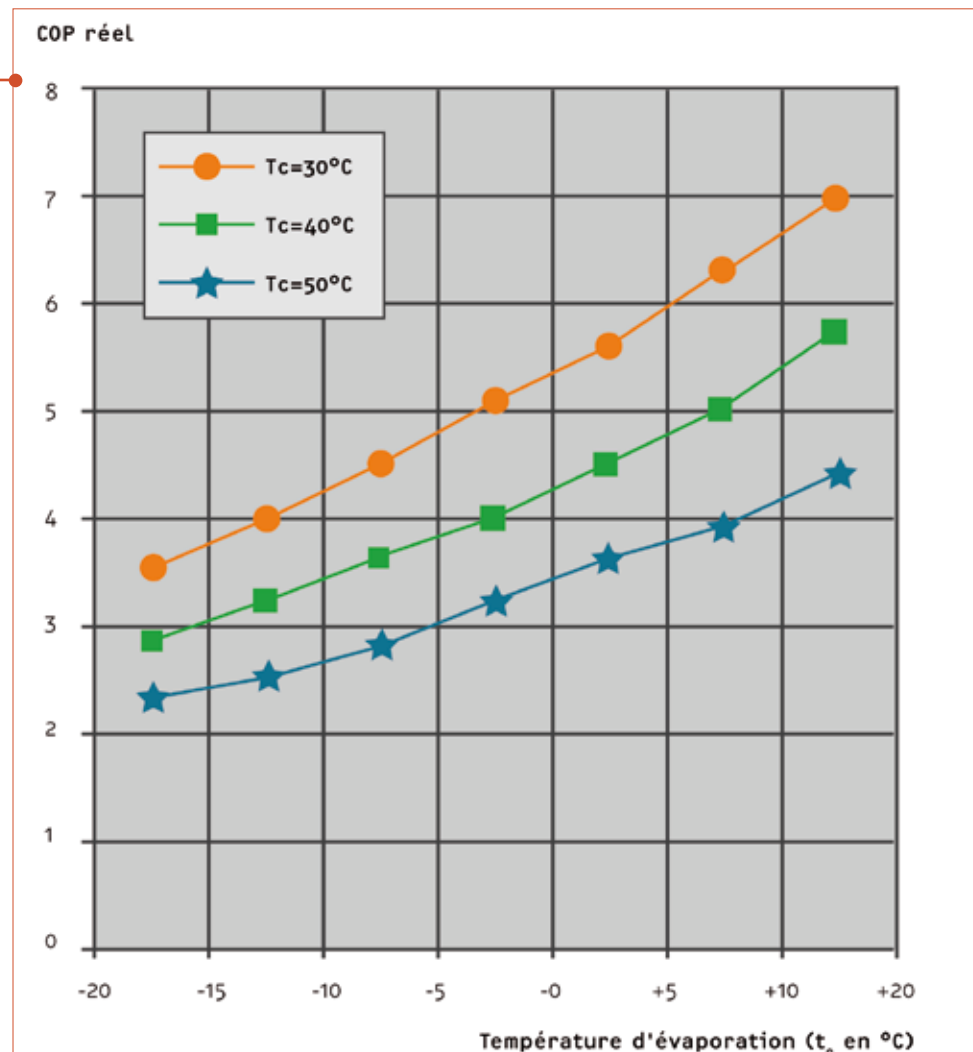
On peut également en déduire un coefficient de réfrigération C_R (appelé parfois coefficient d'efficacité énergétique), rapport de la chaleur absorbée à l'évaporateur à l'énergie reçue au compresseur.

$$C_R = \frac{Q_o}{W_{th}} = \frac{(H_1 - H_5)}{(H_2 - H_1)}$$

Dans la pratique du fait de la difficulté d'évoluer selon le cycle théorique de Carnot et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...), le COP effectif est affecté d'un coefficient de 0,4 à 0,7. On note dès à présent l'importance que revêtira la nature des émetteurs de chauffage pour l'efficacité du système thermodynamique appliqué au chauffage.

Évolution du COP réel en fonction des températures d'évaporation.

Le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la source et le milieu à chauffer sera faible.



Éléments constitutifs d'un système thermodynamique

La source froide (air, sol, eau)	10
Pompes à chaleur à compression.....	11
Pompes à chaleur à absorption	12
La source chaude (milieu à chauffer, systèmes d'émissions hydraulique, aéraulique).....	13
Mises en œuvre particulières (pompe à chaleur réversible, fonctionnement en thermo-frigopompe)	14
Coefficients de performance (COP de la PAC).....	15
Les différents types de fluides frigorigènes	16



Éléments constitutifs d'un système thermodynamique

LA SOURCE FROIDE

(DIFFÉRENTES SOURCES AIR, SOL, EAU...)

¹ Nappe d'eau souterraine :
ou aquifère

Bien que le présent document ait pour objet l'analyse et les perspectives des PAC utilisant comme source froide les nappes d'eau souterraine¹, on procédera à une brève présentation des autres sources froides susceptibles d'être utilisées pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments.

L'air extérieur

C'est la source froide la plus utilisée dans la mesure où elle est disponible partout. L'inconvénient réside dans la variabilité de son niveau de température, et donc de sa baisse de performance pour les températures extérieures basses, au moment où l'on a besoin de plus d'énergie thermique. Il est nécessaire également d'apporter une attention particulière aux problèmes de bruit ainsi qu'au givrage de l'évaporateur.

L'air intérieur

Cette solution est envisageable lorsqu'il y a un renouvellement d'air important. L'inconvénient de cette source est sa limitation en volume et donc en puissance récupérable.

Le sol

Le sol présente l'avantage de constituer un volant thermique intéressant. Les pompes à chaleur utilisant le sol sont souvent désignées sous le vocable de « géothermiques ». Cette filière est en plein développement ; elle s'appuie sur deux systèmes :

² PEHD :
Polyéthylène Haute Densité

- **Les systèmes à capteurs horizontaux** : ils sont constitués par des tubes en PEHD² enterrés dans le sous-sol à une profondeur inférieure à 1 mètre et dans lesquels circule un fluide caloporteur. C'est en fait l'énergie du sol qui provient du rayonnement solaire et de la migration des eaux de pluie qui est exploitée.

- **Les systèmes à capteurs verticaux (sondes géothermiques)** : ce dispositif est constitué par un forage dans lequel est descendu un tube PEHD² coaxial ou en U dans lequel circule en circuit fermé un fluide caloporteur. La profondeur du forage est généralement comprise entre 50 et 100 m (cf annexe 3 sur les capteurs géothermiques verticaux). Pour des besoins importants (petits immeubles collectifs ou ensembles tertiaires) il est possible de multiplier sur un même site le nombre de forages, constituant ainsi un champ de sondes géothermiques.

³ glycolée :
Glycol alimentaire à 30 %

Le fluide caloporteur est en général de l'eau glycolée³.

L'eau

Elle peut être prélevée dans des aquifères (objet de la présente étude), mais elle peut aussi être pompée dans une rivière, dans un lac ou dans la mer. On peut également installer des pompes à chaleur sur des rejets d'eaux usées ou industrielles. Contrairement aux sources précédemment évoquées, l'eau n'est pas disponible partout. Cependant, l'Île-de-France a quand même la chance de disposer dans son sous-sol de nombreux aquifères à faible profondeur pouvant servir de source froide aux systèmes thermodynamiques réversibles.

POMPES À CHALEUR À COMPRESSION

Il existe deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption. Le circuit des pompes à chaleur à compression est constitué des éléments principaux présentés ci-dessous.

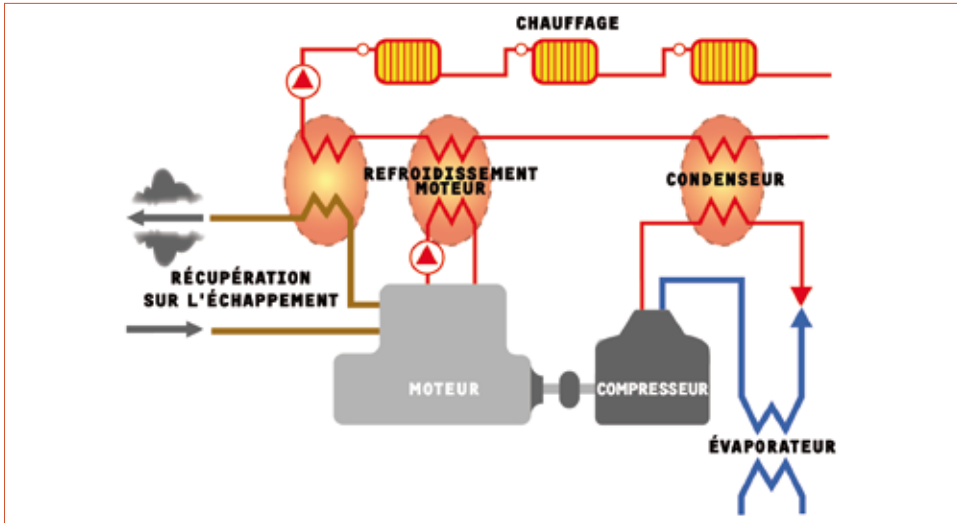


Schéma de principe d'une pompe à chaleur à chaleur à compression, entraînée par un moteur thermique

Compresseur

Il constitue l'organe essentiel de la pompe à chaleur, il peut être à spirales (Scroll), à pistons ou à vis selon la puissance nécessaire. Pour les petites puissances, les compresseurs Scroll (15 - 300 kw) sont les plus utilisés. Généralement le compresseur est entraîné par un moteur électrique. Il peut dans certains cas être entraîné par un moteur thermique ; dans ce cas il y a possibilité de récupérer de la chaleur sur les gaz d'échappement et sur l'eau de refroidissement du moteur.

Pour les pompes à chaleur entraînées par moteurs électriques, la variation électronique de vitesse permet une amélioration notable des performances. La modulation de puissance peut se faire entre 20 et 120 % de la valeur nominale. L'adaptation de la puissance en fonction des besoins permet d'importantes économies d'énergie pouvant aller jusqu'à 30 %.



Compresseur à pistons



Compresseur à vis

	300 kW	500 kW	1500 kW
Scroll	■	■	■
Pistons	■	■	■
Vis	■	■	■

Évaporateur et condenseur

Ce sont des échangeurs de chaleur classiques. Lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau, ils peuvent être à tubes coaxiaux, à plaques brasées, ou multitubulaires. Une attention particulière doit être apportée à leur dimensionnement de façon à garantir leur efficacité dans un encombrement réduit.

Détendeur

La chute de pression entre le condenseur et l'évaporateur est provoquée par un détendeur. Le tube capillaire est le plus simple des systèmes de détente. Afin d'assurer un fonctionnement optimum sur une plus large plage de températures, deux types de détendeurs peuvent être utilisés : le détendeur thermostatique et le détendeur électronique. Ces équipements de détente automatique régulent le fluide de façon à le maintenir à l'état surchauffé avant compression.

À noter que les pompes à chaleur peuvent être multi-circuits comportant plusieurs compresseurs, évaporateurs, condenseurs, etc. pour fournir une puissance plus élevée à partir de systèmes unitaires réalisés en grande série.



Compresseur Scroll



Compresseur à vis

Annexes

Des pompes et des ventilateurs sont nécessaires pour véhiculer les fluides chauffés ou refroidis. La régulation et la programmation intégrant un certain nombre de fonctions sont le gage de l'efficacité, de la sécurité et du confort apporté : « jour et nuit », « été/hiver », ralenti, température réduite, hors gel, etc.

POMPES À CHALEUR À ABSORPTION

D'un point de vue thermodynamique, la pompe à chaleur à absorption se différencie de la PAC à compression par le fait que l'énergie apportée au système l'est sous forme de chaleur.

Le principe est fondé sur l'affinité d'un fluide frigorigène pour un autre liquide, par exemple de l'ammoniac pour l'eau ou de l'eau pour le bromure de lithium. Cette substance est un sel stable et non toxique, par contre l'ammoniac, bien que n'étant pas un gaz à effet de serre, peut être dangereux pour les personnes en cas d'inhalation.

Ces systèmes peuvent produire du chaud et du froid ; ils présentent l'avantage de ne pas avoir de pièces en mouvement.

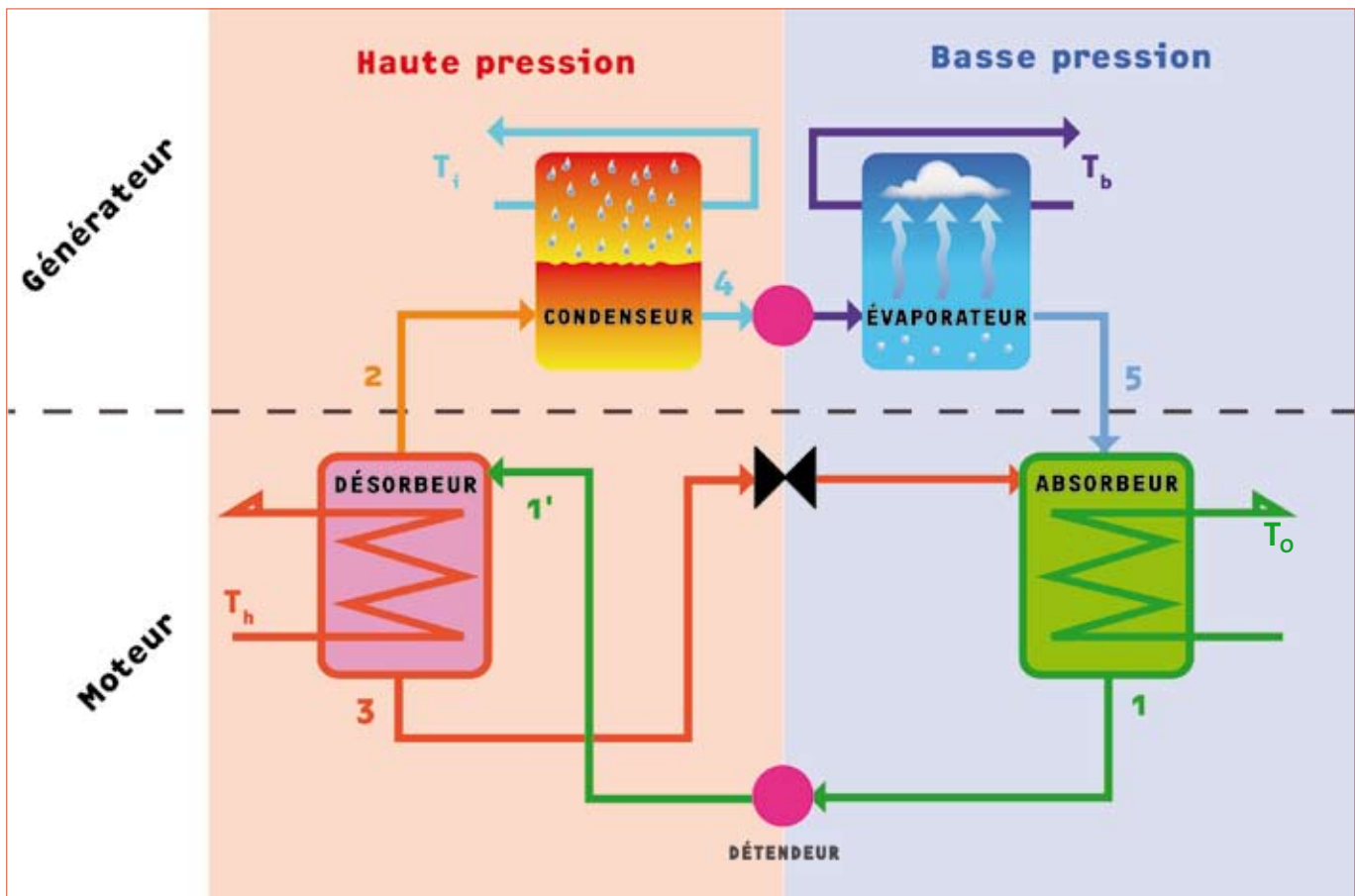


Schéma de principe de la PAC à absorption.

Les quatre éléments principaux de la PAC à absorption

Dans le **désorbeur**, la solution riche en frigorigène (1') reçoit une quantité de chaleur à une température T_h , ce qui provoque la vaporisation d'une partie du frigorigène dissous dans la solution. En sortie de désorbeur, on obtient donc de la vapeur de frigorigène (2) et une solution appauvrie en frigorigène (3).

Le **condenseur** est alimenté par la température T_i du fluide caloporteur, ce qui fixe la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble désorbeur/condenseur. La condensation du frigorigène nécessite le rejet de la chaleur de condensation à la température T_c .

L'**évaporateur** est situé à la sortie du condenseur (4), où le liquide subit un laminage à travers le détendeur, puis s'évapore en prenant la chaleur au fluide ou à l'enceinte à refroidir. La température d'évaporation, et par suite la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur est fixée par la température de la source froide T_b .

Dans l'**absorbeur**, la vapeur issue de l'évaporateur (5) rencontre la solution appauvrie provenant du désorbeur. Elle se dissout dans cette solution, provoquant l'enrichissement de la solution. La chaleur dégagée par cette transformation exothermique est évacuée par un fluide caloporteur à la température T_0 . En sortie d'absorbeur (1), on obtient ainsi une solution enrichie en frigorigène.

NB. : Dans la suite du document, sauf mention spéciale, nous n'abordons que le cas des PAC à compression.

LA SOURCE CHAUDE (MILIEU À CHAUFFER, SYSTÈMES D'ÉMISSIONS HYDRAULIQUE, AÉRAULIQUE...)

Comme cela a déjà été mentionné, la nature des installations terminales de chauffage et/ou rafraîchissement sera déterminante sur les performances du système. Le mode d'émission de chaleur ou de froid peut être effectué en mode hydraulique ou en mode aéraulique.

Émission en mode hydraulique

Il faut distinguer les techniques classiques (radiateurs à eau, planchers chauffants) des techniques en émergence sur le marché (plafonds rayonnants, panneaux radiants...).

En ce qui concerne les radiateurs associés à un chauffage par pompe à chaleur, la loi de régulation fixera les performances du système. **Il y a donc intérêt à mettre en place des émetteurs de grande surface pour abaisser les températures d'émission.** De plus, un radiateur peut difficilement assurer la réversibilité.

Les planchers chauffants, compte tenu de leur grande surface d'émission sont bien adaptés à un chauffage par pompe à chaleur. La réversibilité – moyennant certaines précautions (risques de condensation) – peut être envisagée.

Les plafonds rayonnants hydrauliques ont par rapport au plancher chauffant rafraîchissant des puissances de rafraîchissement nettement plus élevées : de 60 à 80 W/m² pour 30 W/m² maximum pour un plancher. Avec une inertie plus faible et une distribution d'eau froide plus élevée, la maîtrise des risques de condensation est plus facile.

Les planchers et plafonds rayonnants hydrauliques présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes aérauliques : meilleur confort, absence de courants d'air et de bruit et possibilité d'utilisation directe de la nappe d'eau souterraine pour le rafraîchissement.

Émission en mode aéraulique

Ce système est bien adapté au chauffage des bâtiments existants ayant des émetteurs de chaleur inadaptés (haute température), des systèmes de refroidissement anciens ou des grands volumes. Il présente l'avantage à la fois de permettre la ventilation, le filtrage de l'air et d'assurer un renouvellement précis et simple.

La conception et la mise en œuvre des systèmes aérauliques doivent être réalisées en portant une attention particulière pour éviter les inconvénients souvent attachés à ce genre de systèmes (courant d'air, niveau sonore élevé, sensation de trop chaud ou trop froid...).

Les systèmes les plus couramment utilisés sont les **ventilo-convecteurs 2 ou 4 tubes ou 2 tubes - 2 fils**. Des techniques performantes émergent sur le marché (plafond diffusant ou poreux) mais leurs coûts demeurent encore très élevés.

Le recours à un régime d'eau basse température du circuit de diffusion de la chaleur peut être en partie compensé par l'augmentation de la taille de batterie d'échange et l'augmentation du débit avec une contrainte sur l'augmentation de la puissance acoustique, donc du niveau sonore.

En cas de rénovation, le passage d'un régime d'eau 80/60 °C à un régime d'eau 50/40 °C implique une augmentation du débit et de la taille des appareils.

MISES EN ŒUVRE PARTICULIÈRES

Pompe à chaleur réversible

Une pompe à chaleur réversible est une pompe à chaleur qui assure de la production de chaleur en hiver et de la production de froid en été.

Pour cela il convient d'inverser le cycle du fluide frigorigène en installant sur le circuit frigorifique une vanne à 4 voies. Le condenseur devient ainsi évaporateur et l'évaporateur devient condenseur. Il est alors possible de prélever, en été, de la chaleur dans le local que l'on a chauffé en hiver pour la rejeter dans le milieu extérieur (air, eau ou sol). Il est à noter que, dans ce cas, le fonctionnement de la machine thermodynamique est tout à fait identique dans son principe à celui du fonctionnement en mode chauffage.

Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible

Fonctionnement été

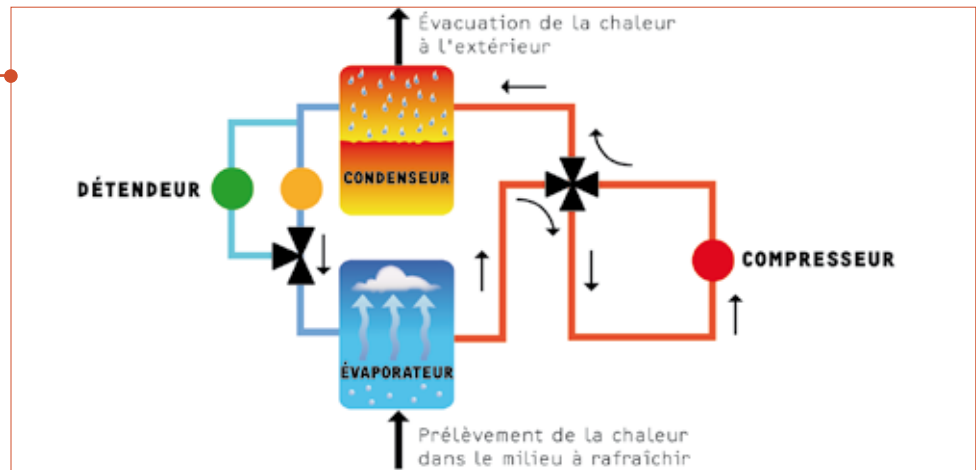
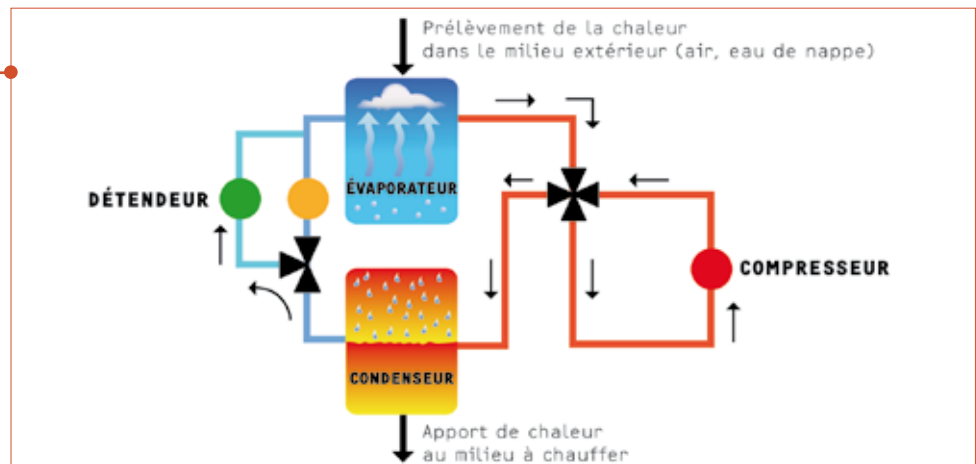
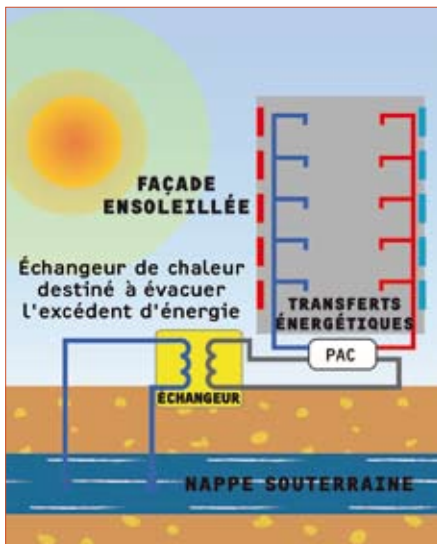


Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible

Fonctionnement Hiver



Principe de fonctionnement en thermofrigopompe



Fonctionnement en thermofrigopompe

Une production simultanée de chaud et de froid est possible, c'est le fonctionnement en « thermofrigopompe ». Elle peut être valorisée par la mise en œuvre de réseaux de distribution d'eau chaude et d'eau glacée alimentant les différents systèmes de traitement (centrale de traitement d'air, plancher rayonnant, appareils terminaux...). On parle de système « 4 tubes » (voir p. 13). L'énergie excédentaire (énergie chaude ou froide non utilisée pour les besoins du bâtiment) est alors évacuée à l'extérieur (aquifère). En fonction des besoins à satisfaire, 5 schémas de fonctionnement peuvent être envisagés (voir schémas pages 30 et 31).

- Chaud seulement ;
- Chaud et froid avec rejet froid sur le forage, chaud > froid ;
- Chaud et froid sans rejet, chaud = froid ;
- Chaud et froid avec rejet chaud sur le forage, froid > chaud ;
- Froid seulement.

La production de chaud et de froid peut se faire, soit par un système centralisé qui distribue les fluides à partir du même local technique, soit par un système décentralisé où chaque local à climatiser possède son propre système thermodynamique. Chaque cas est particulier et dépend de la répartition dans le temps de chaud et de froid.

COEFFICIENTS DE PERFORMANCE (COP)

Au premier chapitre, le coefficient de performance théorique (ou idéal) a été défini à partir des températures de la source froide et de la source chaude.

Comme cela a été précisé, le COP réel intégrant les pertes et le rendement est différent du COP théorique de Carnot. En fait il en existe plusieurs.

Le coefficient de performance (COP) qui définit la performance énergétique de la pompe à chaleur en mode chaud est mesuré selon les normes en vigueur définies au niveau européen (norme EN 12055, certification Eurovent - www.eurovent-certification.com) :

$$\text{COP} = \frac{P_{\text{CH}}}{P_{\text{COMP}}}$$

Plus cette valeur est élevée, meilleure est la machine. Les valeurs données par les constructeurs sont généralement comprises entre 4 et 5.

Plusieurs types de COP peuvent être définis, correspondant à la prise en compte des consommations d'énergie électrique d'équipements auxiliaires. Aussi, il importe de maîtriser le sens et la méthode de détermination du COP pour juger de la performance d'une pompe à chaleur, voire de l'installation globale.

COP de la pompe à chaleur

COP machine

Il s'agit du rapport de l'énergie thermique produite par la PAC sur l'énergie électrique consommée par la PAC (compresseurs + auxiliaires non permanents). C'est le COP du groupe thermodynamique seul, tel qu'il peut être mesuré en usine par le constructeur.

Ce coefficient prend en compte les consommations électriques des auxiliaires non permanents dont le fonctionnement est asservi à la marche de la PAC ou qui sont alimentés périodiquement.

Ces auxiliaires peuvent être :

- les ventilateurs (cas d'une pompe à chaleur sur l'air) ;
- des pompes de circulation asservies (avec fonctionnement simultané) au compresseur ;
- des résistances électriques (par exemple dégivrage des batteries).

$$\text{COP} = \frac{P_{\text{CH}}}{(P_{\text{COMP}} + P_{\text{AUX}})}$$

Cette valeur est donc plus représentative de la performance de la machine.

COP système

C'est le rapport entre l'énergie thermique produite par la PAC et l'énergie électrique consommée par cette PAC, les auxiliaires permanents et l'appoint, le cas échéant.

COP global de l'installation

Ce coefficient prend en compte les pertes d'énergies (par les réseaux de distribution notamment) qui ne contribuent pas au chauffage des locaux.

$$\text{COP} = \frac{(P_{\text{CH}} - \text{Pertes})}{(P_{\text{COMP}} + P_{\text{AUX}})}$$

COP annuel global de l'installation

C'est la valeur moyenne du COP système sur l'année

C'est le COP qui intéresse le maître d'ouvrage, pour calculer les performances énergétiques moyennes de l'installation, et donc calculer la rentabilité économique de son opération.

Sur les plages de température des PAC géothermiques sur aquifères (source froide > 12 °C), des COP mesurés sur des installations en exploitation donnent des valeurs généralement supérieures à 3,5.

P_{CH} :
Puissance chaud de la PAC,

P_{FR} :
Puissance froid de la PAC,

P_{COMP} :
Puissance électrique absorbée
par le compresseur,

P_{AUX} :
Puissance des auxiliaires.

Efficacité énergétique

La performance en mode froid de la machine frigorifique réversible est exprimée par le coefficient d'efficacité énergétique :

$$C_{FR} = \frac{P_{FR}}{P_{COMP}}$$

Cas de la thermofrigopompe

Dans ce mode de fonctionnement particulier, le coefficient de performance (COP) est défini de la manière suivante :

$$COP = \frac{(P_{CHUTILISÉE} + P_{FRUTILISÉE})}{(P_{COMP} + P_{AUX})}$$

Il est impératif que le personnel d'intervention puisse justifier de cette qualification.

- 1 CFC :**
ChloroFluoroCarbones
- 2 HCFC :**
HydroChloroFluoroCarbones
- 3 HFC :**
HydroFluoroCarbones
- 4 GWP :**
Global Warming Potential

LES DIFFÉRENTS TYPES DE FLUIDES FRIGORIGÈNES

Compte tenu de leur incidence sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, les fluides frigorigènes sont soumis à une réglementation de plus en plus contraignante.

L'utilisation des CFC¹ est désormais interdite car destructeur de la couche d'ozone. L'utilisation des HCFC² sera interdite en 2012, car ils contribuent également à la destruction de la couche d'ozone mais de manière moins importante que les CFC. Ils sont actuellement remplacés par des HFC³ qui ne sont pas non plus sans impact sur l'environnement (effet de serre).

On caractérise chaque fluide frigorigène par son **potentiel de réchauffement global (PRG ou GWP⁴)** exprimé en kg équivalent CO₂.

Compte tenu des contraintes qui pèsent sur ces fluides à GWP élevé, les recherches s'intensifient pour trouver des solutions alternatives. On peut dans certaines configurations et moyennant certaines précautions utiliser des fluides inflammables (isobutane) ou toxiques (ammoniac).

La **récupération des fluides contenus** dans tous les équipements est **obligatoire** et doit être intégrale. Les fluides ainsi collectés et non réutilisables doivent être détruits dans des conditions respectueuses de l'environnement conformément à la législation.

Pour chaque installation frigorifique, un contrôle d'étanchéité doit être réalisé par une entreprise agréée au moins une fois par an lors de la mise en service et à chaque modification des équipements.

Le décret 92-1271 (du 7/12/92) modifié par le décret 98-560 du 30/06/98, et le règlement 2037-2000 fixent les règles de confinement de récupération et de manipulation des fluides frigorigènes ainsi que la qualification minimale des intervenants (autorisation préfectorale).

À titre d'exemple : 1 kg de R-404a relâché dans l'atmosphère produit autant d'effet de serre que le CO₂ émis par une voiture parcourant 20 000 km. Les fluides frigorigènes sont aussi souvent utilisés en mélange.

Nature du fluide frigorigène	Pouvoir de réchauffement global (GWP) en kg CO ₂ /kg de fluide	Particularités
R-22 (HCFC)	1 700	Interdit en 2012
R-134a HFC	1 300	
R-407c HFC	1 600	
R-404a HFC	3 800	
R-410a HFC	1 900	Utilisation limite jusqu'à 45 °C
R-290 (propane)	3	inflammabilité
CO ₂	1	expérimentation
NH ₃	0,1	Emanations toxiques (en cas de fuite)

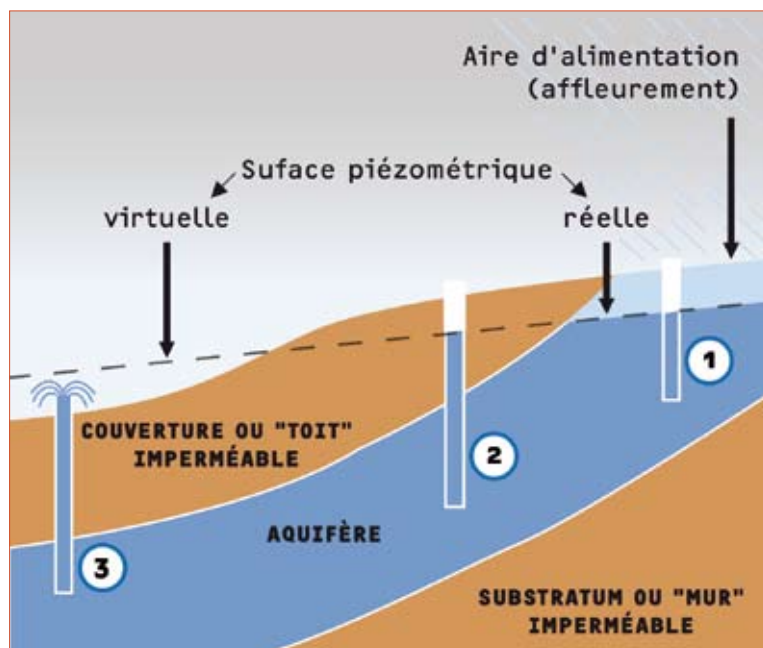
Caractéristiques des principaux fluides frigorigènes

Caractéristiques des aquifères superficiels

Définitions	18
Paramètres liés au réservoir (porosité, perméabilité- transmissivité).....	18
Paramètres liés au fluide (chimie, bactériologie)	20
Caractéristiques des aquifères superficiels de l'Île-de-France	21



Caractéristiques des aquifères superficiels



En 1, la nappe est libre.
En 2 elle est captive.
En 3, elle est captive et artésienne.

DÉFINITIONS (nappe libre, nappe captive, piézométrie, types de réservoirs...)

Une nappe d'eau souterraine est définie comme « ensemble de l'eau présente dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique ».

Un aquifère peut être défini comme un « corps (couche, massif) de roches perméables à l'eau, à substrat et parfois à couverture de roches moins perméables, comportant une zone saturée et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables ». Ces deux définitions sont celles retenues par le Comité national français des sciences hydrologiques (<http://www.cjg.ensmp.fr/~hubert/termino.htm>).

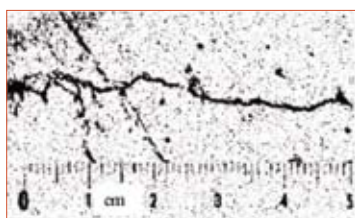
Types de nappes

Selon les conditions morphologiques et géologiques, une nappe d'eau souterraine peut être **libre** (système aquifère libre) ou **captive** (système aquifère captif).

Dans le cas d'une nappe libre, le **niveau piézométrique** correspond à la limite entre la zone **non saturée** et la zone **saturée** en eau.

Ce niveau varie essentiellement en fonction des fluctuations climatiques, notamment saisonnières.

Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage. Le niveau de l'eau stabilisé dans le forage représente le niveau piézométrique. Si le niveau piézométrique se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. On dit que le forage est **artésien**.



Porosité de fissure.

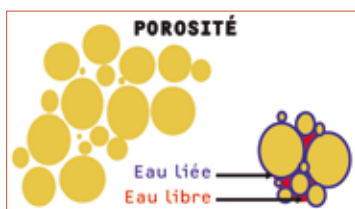
PARAMÈTRES LIÉS À L'AQUIFÈRE

Il s'agit de la porosité, de la transmissivité, de la pression et de la température.

Porosité

La quantité d'eau qu'un aquifère emmagasine (réserve) dépend de ses **dimensions** (étendue, épaisseur) et de la **porosité** des roches qui le constituent ; le **débit** qu'il écoule est, quant à lui, fonction de la **perméabilité** des roches. Suivant le type de porosité des formations rocheuses, on distingue classiquement :

- **Les aquifères à porosité d'interstices** : dans ces formations (sables, grès, craie) l'eau circule principalement entre les grains (sables, certains grès), mais aussi dans les



Porosité d'interstice.

fissures qui ont pu se développer dans la « masse ».

- **Les aquifères fissurés/fracturés** : les roches qui les constituent (granites, roches métamorphiques, calcaires) sont très peu poreuses mais le réseau de fractures parfois bien développé qui les affecte peut en faire des aquifères intéressants.

Perméabilité – transmissivité

La **perméabilité** d'un aquifère est la propriété d'un aquifère à laisser passer, à travers lui, l'eau en mouvement sous l'effet d'une différence de pression.

Elle s'exprime par le coefficient de perméabilité K , en mètres par seconde, lié au débit de fluide par unité de surface de roche traversée V et au gradient de pression exercé par le fluide $\frac{dP}{dx}$, et s'exprime par la relation :

$$V = K \frac{dP}{dx}$$

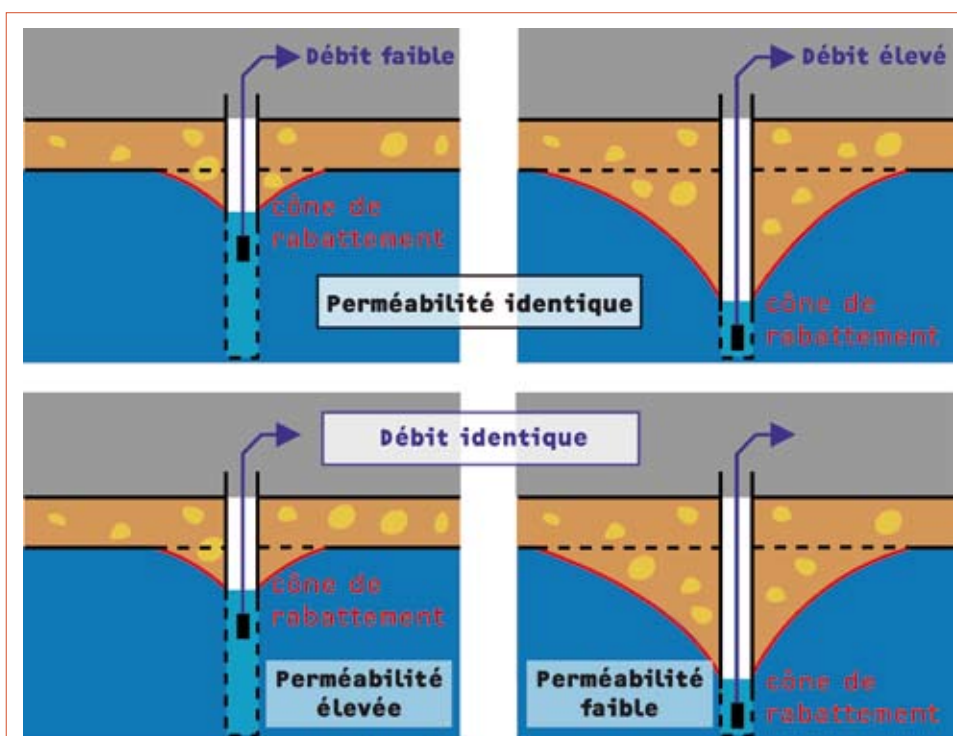
Porosité et perméabilité sont deux notions bien distinctes : une roche peut être poreuse mais imperméable (argile).

Dans certains réservoirs souvent granitiques ou calcaires, la perméabilité est due à la présence d'un réseau interconnecté de fissures dans la roche réservoir.

Transmissivité : ce paramètre est égal au produit de la hauteur productrice (h) de l'aquifère par la perméabilité moyenne sur cette hauteur. Elle s'exprime en m^2/s . Ce paramètre est fondamental pour déterminer la **productivité** d'un aquifère.

Pression hydrostatique du gisement : la pression statique du gisement correspond à la pression de l'aquifère dans les conditions naturelles, sans pompage, ni réinjection. La pression en tête de puits est aussi fonction de l'altitude. Si cette pression est positive, ce qui est souvent le cas, le puits sera **artésien** (l'eau jaillit naturellement).

Sous l'effet du pompage on constate l'abaissement de la surface d'une nappe libre ou de la surface piézométrique. Ce phénomène illustré dans les graphiques ci-dessous est désigné sous le terme de **rabattement**.



Relation perméabilité, débit et rabattement dans le captage.

PARAMÈTRES LIÉS AU FLUIDE

(CHIMIE DU FLUIDE, BACTÉRIOLOGIE)

Les performances d'un forage peuvent être affectées par des phénomènes physiques, chimiques et bactériologiques. Les désordres généralement constatés dans les forages sont les colmatages et la corrosion.

Les **colmatages** sont causés par des incrustations de matières et de corps étrangers qui se déposent et s'accumulent dans les forages.

On peut rencontrer :

- Des dépôts formés de carbonates et sulfates.
- Des précipités formés par des composés ferreux, manganéux qui peuvent à terme obstruer totalement l'ouverture des crépines. Ces dépôts apparaissent lorsque le fer est mis en condition aérobie provoquant la précipitation d'hydroxydes ferriques.
- Des boues engendrées par le développement de bactéries.
- Des colmatages provoqués par des particules fines de l'aquifère qui se déposent soit dans le fond de l'ouvrage, soit autour de la crépine.

La **corrosion** est le phénomène faisant apparaître des perforations des tubages métalliques qui entraînent à terme la fragilisation des tubages et l'introduction de particules dans l'ouvrage. Ces particules engendrent ensuite des colmatages ou dans le cas du sable, une usure des équipements de pompage. Les principales causes de la corrosion sont dues à des phénomènes chimiques ou électrochimiques.

Les conditions d'exploitation peuvent être affectées par les éléments et gaz dissous dans le fluide issu de l'aquifère.

La concentration d'un composé dissous s'exprime en g/l, ppm, ou mol/l.

Les conditions d'apparition de la corrosion ou de dépôts sont favorisées par les situations suivantes :

- pH des eaux acides (pH <7),
- présence d'oxygène dissous,
- présence d'hydrogène sulfuré (H₂S),
- présence de CO₂ (> 50 ppm),
- présence de chlore (>300 ppm).

D'autres indicateurs sont à prendre en compte :

- **GLR** ou « gas liquid ratio » qui mesure la quantité de gaz libéré par l'eau à pression atmosphérique ;
- **PB** : pression de point de bulle, pression au-dessous de laquelle il y a séparation de phase entre le liquide et les gaz dissous ;
- présence de **bactéries** (ferro-réductrices, sulfato-réductrices...).

Il faut faire systématiquement une **analyse d'eau** qui devra comporter a minima les éléments suivants :

- **dureté** : présence de calcaire (risque de colmatage) ;
- **agressivité** : présence de fer, manganèse, chlore (risque de corrosion) ;
- **turbidité** : présence de fines particules, boues (risque de colmatage).

L'index de Riznar est un indicateur calculé à partir de la chimie de l'eau qui permet de représenter la stabilité de l'eau, sa nature agressive ou entartrante.

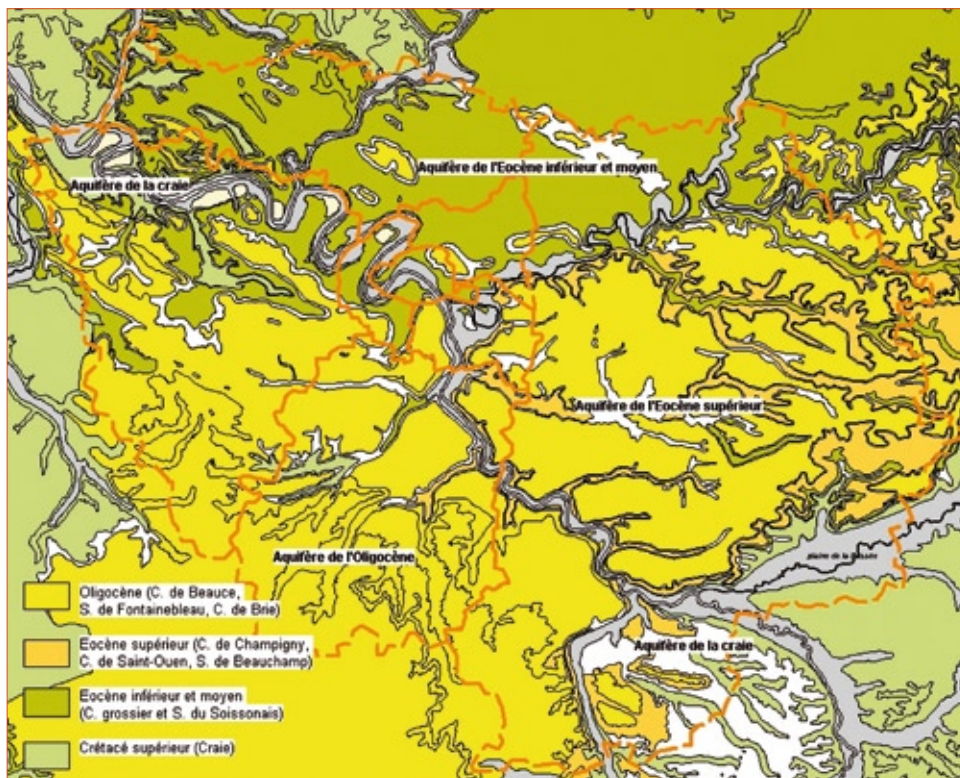
IR > 8,7	Eaux très agressives
8,7 > IR > 6,9	Eaux moyennement agressives
6,9 > IR > 5,8	Eaux stables
5,8 > IR > 3,7	Eaux entartrantes
3,7 > IR	Eaux très entartrantes

CARACTÉRISTIQUES DES AQUIFÈRES SUPERFICIELS DE L'ÎLE-DE-FRANCE

L'analyse des différentes formations de la région Ile-de-France pouvant contenir des aquifères propices à l'installation de pompes à chaleur géothermales a conduit à retenir quatre aquifères :

- l'aquifère de l'Oligocène,
- l'aquifère de l'Éocène supérieur,
- l'aquifère de l'Éocène moyen et inférieur,
- l'aquifère de la Craie d'âge Sénonien du Crétacé supérieur.

Les alluvions d'âge quaternaire n'ont pas été retenues, compte tenu de leur caractère extrêmement vulnérable tant aux aléas climatiques qu'à l'activité humaine.



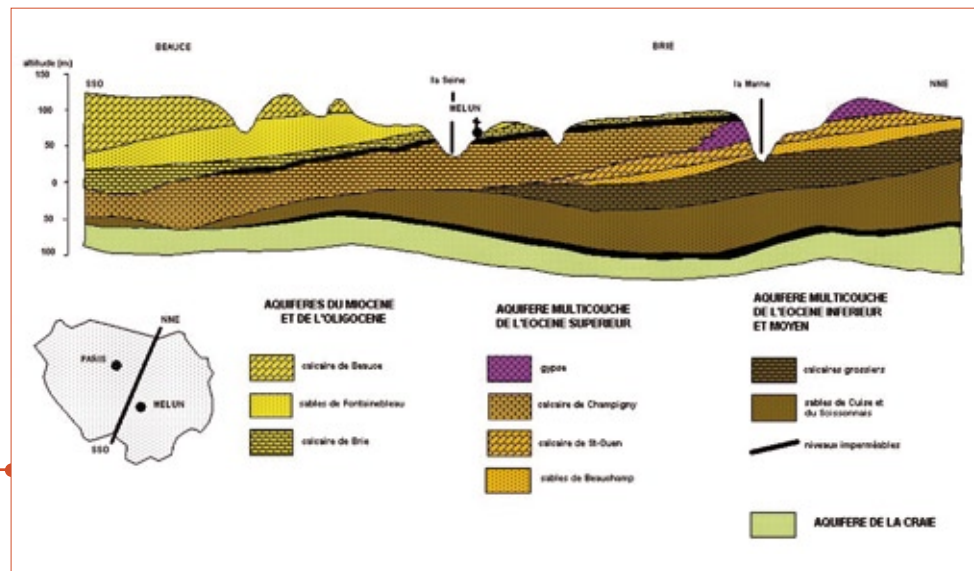
Répartition géographique des quatre aquifères multicouches.

Ces aquifères sont dits multicouches, car la géologie du bassin de Paris est relativement complexe dans la mesure où les nappes d'eau souterraine contenues dans chaque formation ne s'étendent pas à l'ensemble du volume disponible et que, par ailleurs, l'amincissement ou la disparition locale des formations étanches séparant des aquifères peuvent conduire à la mise en communication de ceux-ci.

Sur le site www.geothermie-perspectives.fr sont présentées un certain nombre d'informations sur ces aquifères : toit et du mur de la formation, profondeur de la nappe, d'épaisseur de la nappe, hydrochimie de la nappe, transmissivité, débits potentiels par aquifère.

Le croisement de ces données a conduit à la réalisation de cartes d'exploitabilité pour chacun des aquifères retenus. Au stade de l'examen préalable d'un projet thermique avec pompe à chaleur sur nappe d'eau souterraine, ces cartes d'exploitabilité permettent d'évaluer la puissance thermique délivrable sur le site considéré.

Coupe géologique Nord-Est - Sud-Ouest de la région Ile-de-France.



On distingue les quatre aquifères multicouches suivants, du moins profond au plus profond :

L'aquifère multicouche de l'Oligocène

(-23 à -35 millions d'années)

Il est composé des Calcaires de Beauce, des Sables de Fontainebleau et du Calcaire de Brie. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les formations imperméables des Marnes Vertes d'âge Sannoisien ainsi que par les Marnes supra gypseuses (Marnes de Pantin, et Marnes d'Argenteuil), toutes d'âge Bartonien supérieur.

L'aquifère multicouche de l'Éocène supérieur

(-35 à -42 millions d'années)

Il comprend le Calcaire de Champigny, les Sables de Montceau, les Calcaires de Saint-Ouen et les Sables de Beauchamp. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les formations semi-imperméables des Marnes et Caillasses d'âge Lutétien supérieur, sous-étage de l'Éocène supérieur.

L'aquifère multicouche de l'Éocène moyen et inférieur

(-42 à -60 millions d'années)

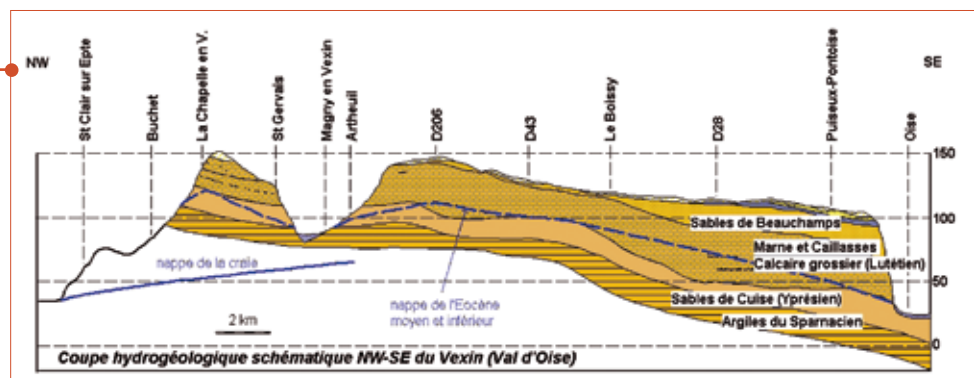
Il se compose du Calcaire Grossier du Lutétien inférieur, des Sables de Cuisse et des Sables du Soissonnais. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure essentiellement par les formations imperméables des Argiles plastiques du Sparnacien (Éocène inférieur).

L'aquifère de la Craie d'âge Sénonien du Crétacé supérieur

(-42 à -60 millions d'années)

Il s'agit d'une formation très épaisse, exploitable uniquement dans les parties affleurantes.

Coupe hydrogéologique Nord-Ouest - Sud-Est du Vexin (95).



Détermination des besoins

Besoins de chaud	24
Besoins de froid.....	26
Fourniture d'eau chaude sanitaire (ECS)	26



Détermination des besoins

La détermination des puissances nécessaires à mettre en œuvre pour assurer les besoins de chaud et de froid pour un bâtiment du secteur tertiaire est en général une opération complexe qui fait entrer en jeu de nombreux paramètres.

La première démarche, que ce soit pour une construction neuve ou une habitation à rénover, est de mettre en œuvre quelques principes simples permettant de limiter les besoins thermiques. Parmi ceux-ci on peut citer par exemple : la prise en compte de l'environnement (terrain, ensoleillement, vent, etc.), bien isoler, capter et stocker l'énergie solaire, favoriser l'éclairage naturel... Il est également recommandé de faire appel à un architecte engagé dans une démarche de qualité environnementale du bâti, par exemple HQE (www.assohqe.org). Le léger surinvestissement occasionné par la mise en œuvre de ces mesures est vite récupéré par les économies engendrées sans compter les bienfaits pour l'environnement.

Pour les constructions neuves et en réhabilitation, la réglementation thermique en vigueur devra être respectée (voir encadré ci-dessous sur la **RT 2005**).

BESOINS DE CHAUD

L'évaluation des besoins thermiques d'un bâtiment dépend de ses caractéristiques (isolation, occupation, renouvellement d'air) et des conditions climatiques du lieu considéré.

RÉGLEMENTATION THERMIQUE RT 2005

Les permis de construire déposés à compter du 1^{er} Septembre 2006 doivent respecter des exigences renforcées de performance énergétique (dites RT 2005), permettant une économie d'au moins 15 % sur les consommations d'énergie liées au chauffage par rapport à la RT 2000, la ventilation et l'eau chaude dans les logements.

Ces nouvelles exigences applicables aux constructions neuves favorisent le recours à des matériels performants utilisant les énergies renouvelables. Les bâtiments d'habitation devront chauffer pour partie leur eau chaude sanitaire par des systèmes faisant appel aux ENR (capteurs solaires, PAC) ou à défaut, compenser par des économies d'énergie sur d'autres parties du bâtiment.

Les bâtiments non résidentiels sont concernés par ces nouvelles exigences de bonne conception qui portent également sur les consommations d'éclairage et de climatisation.

Sauf cas particuliers (hôpitaux, bâtiments exposés au bruit...), les nouveaux bâtiments climatisés ne doivent pas consommer plus que des bâtiments non climatisés.

* Ce coefficient G était utilisé avant les RT2000 et 2005. Il est remplacé par le coefficient Ubat qui représente le rapport des pertes du bâti par la surface total des parois. Le coefficient G n'en demeure pas moins pratique d'utilisation. Les bâtiments actuels bien isolés ont un G compris entre 0,6 et 0,8.

Démarche simplifiée

Un bâtiment est caractérisé par son coefficient G^* de déperdition volumique exprimé en **Watt/m³/°C**. L'installation de chauffage sera caractérisée par sa capacité à assurer la température intérieure souhaitée (par exemple 19 °C) pour la température extérieure la plus basse susceptible d'être rencontrée sur le site : **Teb** (par exemple, **Teb** = - 7 °C en Ile-de-France).

On considère généralement qu'il existe des apports internes (personnes et appareils) et externes (soleil) représentant de l'ordre de 2 à 3 °C.

La puissance à installer devra donc être supérieure ou égale à :

$$P [W] = G \times V \text{ (volume à chauffer en m}^3\text{)} \times \{(T \text{ interne} - T \text{ apports gratuits}) - T_{\text{eb}}\}$$

Pour calculer les consommations, il est nécessaire d'intégrer la fréquence d'apparition des températures extérieures (**Te**) nécessitant du chauffage que l'on caractérise par un nombre de degrés jours unifiés (DJU) pour une température extérieure de non chauffage (généralement 18 °C) :

$$DJU = \sum_{T_e = T_{\text{eb}}}^{T_e = 18^\circ\text{C}} N_e (18 - T_e)$$

N_e représente la fréquence (en nombre de jours) d'apparition de la température extérieure.

La quantité de chaleur utile nécessaire pour vaincre les déperditions du bâtiment est égale à :

$$Q \text{ [Wh]} = 24 \times G \times V \times \text{DJU}$$

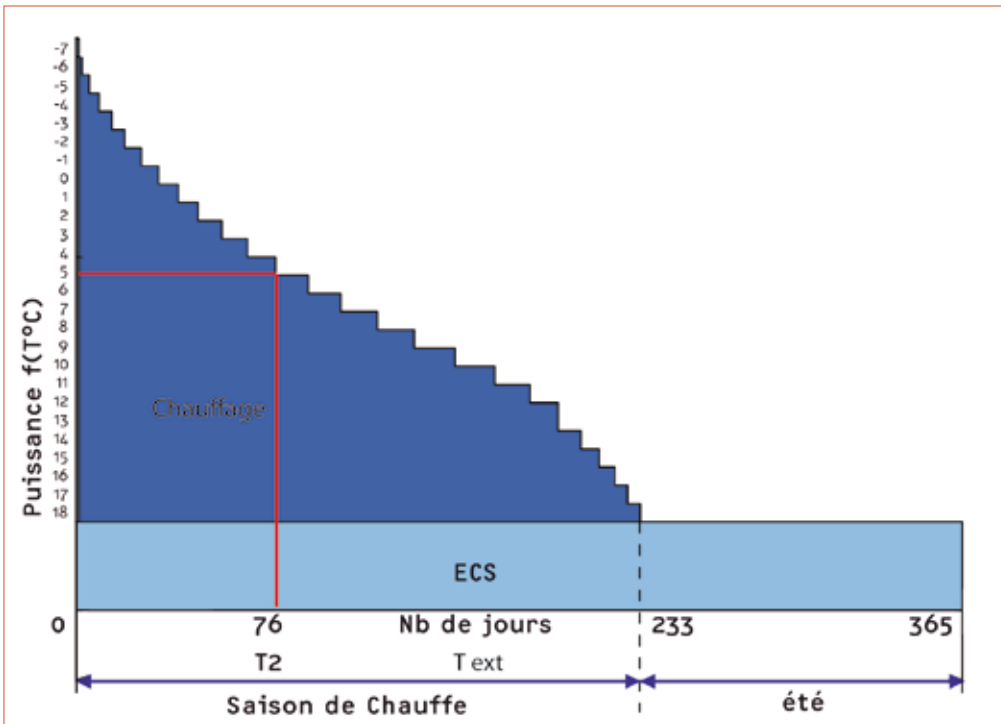
Les graphiques ci-après font figurer pour chaque température extérieure la puissance nécessaire en ordonnées et le nombre de jours d'apparition de cette température en abscisse.

La courbe représentative des besoins en fonction des températures extérieures s'appelle **courbe monotone**, sa superficie représente les besoins thermiques de l'équipement à chauffer.

Fréquences cumulées des degrés jours de la région parisienne
(chauffage uniquement)

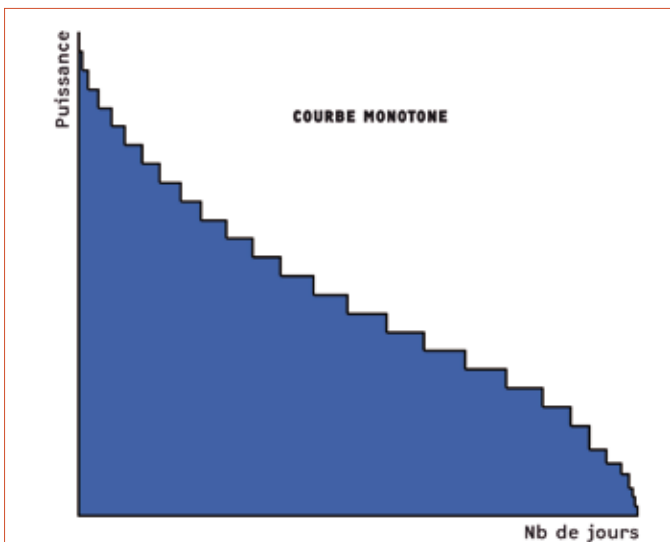
Température extérieure	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Nb jours	1	1	2	3	4	4	6	6	8	8	10	11	12	14	15	17	17	19	18	16	12	9	7	5	4	4	
Nb jours cumulés	1	2	4	7	11	15	21	27	35	43	53	64	76	90	105	122	139	158	176	192	204	213	220	225	229	233	
DJU	25	24	46	66	84	80	114	108	136	128	150	154	156	168	165	170	153	152	126	96	60	36	21	10	4	0	2423

Teb*=-7



Courbe monotone
(chauffage et ECS).

Teb*=-7



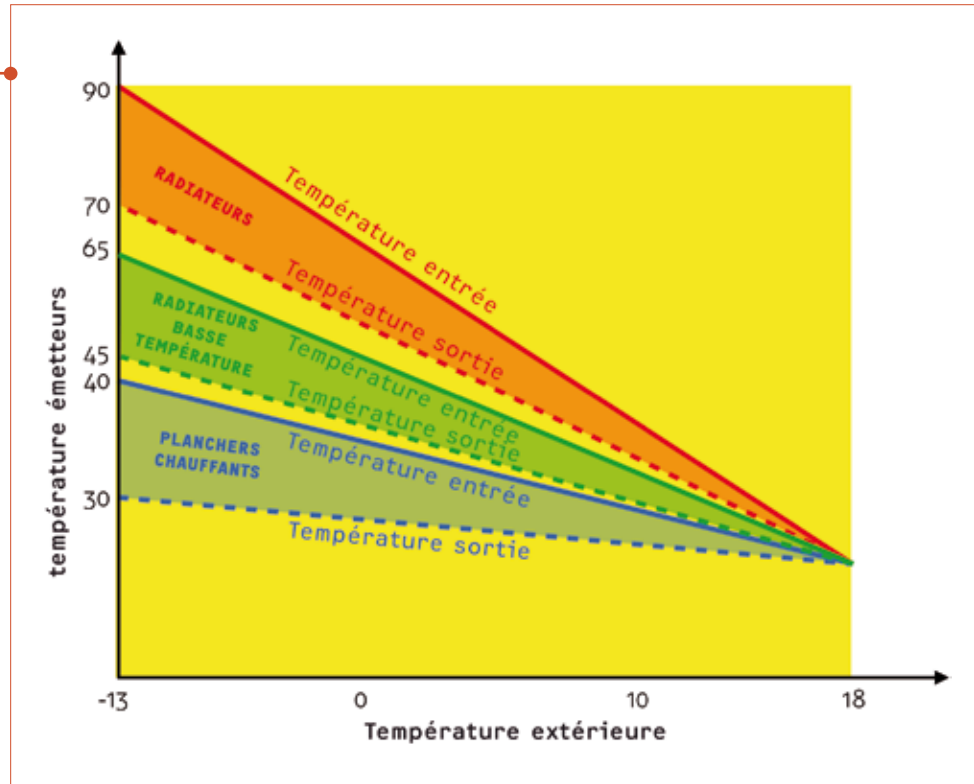
Courbe monotone
(chauffage seul).

Teb* Température extérieure la plus basse

LOIS DE RÉGULATION DITES LOIS D'EAU

Les températures aller - retour des systèmes d'émission sont fonction des surfaces des émetteurs de chaleur. Comme cela a été précisé plus haut dans le chapitre sur les principes de base, le coefficient de performance de la PAC sera d'autant meilleur que les températures entrée seront basses. Par ailleurs le COP instantané (cf page 29) s'améliore lorsque la température extérieure augmente.

Lois de régulation des systèmes d'émission (dites lois d'eau).



BESOINS DE FROID

La détermination des besoins de froid nécessite l'intégration de nombreux paramètres en particulier :

- l'humidité relative (HR) du site,
- l'ensoleillement,
- l'orientation du bâtiment,
- l'importance et l'orientation des surfaces vitrées,
- la température intérieure définie par le maître d'ouvrage,
- les apports par ventilation et infiltration d'air,
- les apports internes (occupants, éclairages, informatique...).

Il existe des logiciels qui permettent une évaluation rapide des besoins de froid à mettre en œuvre.

FOURNITURE D'EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS)

La fourniture d'eau chaude sanitaire (ECS) à partir de la PAC présente l'inconvénient de devoir porter l'eau à une température élevée (eau portée pendant 1 heure, à 65 °C pour éviter les risques de développement de la légionella, la distribution ne devant pas excéder 55 °C). Il est clair que cette contrainte a une incidence sur la performance de la PAC. Pour produire de l'ECS à partir de la PAC, il existe deux solutions : un système indépendant du système de chauffage ou un système intégrant les deux fonctions ECS et chauffage.

Selon le niveau de température susceptible d'être fourni par la PAC, il sera possible de faire appel à une résistance électrique. Notons qu'il existe des fluides frigorigènes (R134a) permettant d'atteindre des températures d'eau jusqu'à 65 °C et donc des machines thermodynamiques haute température.

Adéquation

ressource géothermale - besoins thermiques

Principes	28
Mode de fonctionnement hivernal (chauffage)	28
Mode de fonctionnement estival (rafraîchissement)	29
Schémas de montage	31
Pompe à chaleur réversible	31
Thermofrigopompe	32
Pompe à chaleur sur boucle d'eau froide	33
Bilan énergétique	34



Adéquation ressource géothermale- besoins thermiques

PRINCIPES

Les points clés de la réussite d'une opération PAC géothermique sur aquifère sont :

- la détermination des besoins en chaud ;
- la détermination des besoins en rafraîchissement ;
- la réalisation d'une étude hydrogéologique ;
- le choix d'émetteurs basse température (planchers chauffants, ventilo-convecteurs...).

Etant donné le contexte de l'opération rappelé dans le préambule, c'est de la qualité de la mise en adéquation de la ressource et des besoins, dont va dépendre l'efficacité énergétique et économique de l'opération.

Le déroulement d'une opération ainsi que le cahier des charges d'une étude de faisabilité sont présentés en annexe.

En fonction de l'écart entre le potentiel de la ressource (« débit maximum probable ») et le débit maximum utile (débit permettant de satisfaire la totalité des besoins théoriques), une analyse détaillée doit être menée pour définir le **taux de couverture optimal** résultant du meilleur compromis entre le taux de couverture, les coûts d'investissement et les économies générées.

Il n'est en effet pas toujours pertinent de chercher à couvrir la totalité des besoins avec la solution PAC sur nappe.

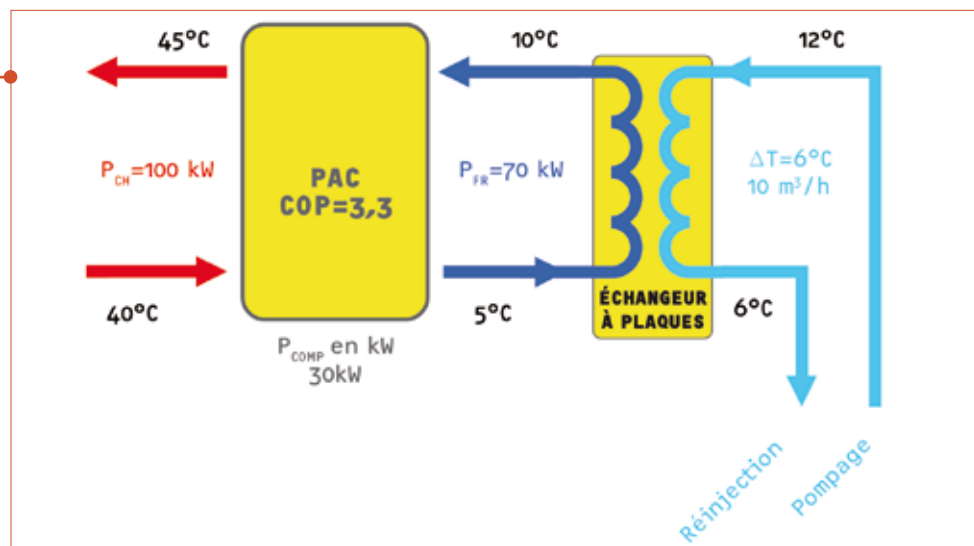
L'analyse du fonctionnement dynamique du bâtiment et des systèmes permet de mettre en évidence les fluctuations d'appel de puissance et notamment le fait que les puissances maximales (donc les débits de pompage sur nappe) sont appelées une faible part du temps de fonctionnement (cf courbe monotone page 25).

Le dimensionnement de la PAC sera donc établi soit pour assurer la totalité des besoins, soit pour fonctionner en « base » (par exemple, en Ile-de-France, 70 % de la puissance chauffage couvrant 90 % des besoins).

Dans l'hypothèse de la couverture totale des besoins, la PAC sera dimensionnée pour assurer la puissance maximale la plus élevée du chaud ou du froid.

,Mode de fonctionnement hivernal (chauffage)

Exemple de dimensionnement en mode chauffage.



$$\text{COP machine : } \text{COP} = \frac{P_{\text{CH}}}{P_{\text{COMP}}} \text{ soit } P_{\text{COMP}} = \frac{P_{\text{CH}}}{\text{COP}}$$

La puissance prélevée sur la source froide est :

$$P_{\text{FR}} = P_{\text{CH}} - P_{\text{COMP}} = 1 - \frac{1}{\text{COP}} \times P_{\text{CH}}$$

Avec une valeur de COP de 3,5 la relation devient :

$$P_{\text{FR}} = 0,7 P_{\text{CH}}$$

La relation entre la puissance prélevée sur la source froide et le débit d'eau de nappe est donnée par :

$$P_{\text{FR}} = D \times 1,16 \times \Delta T$$

Avec :

D : Débit d'eau à prélever sur la nappe en m³/h

ΔT : Ecart de température prélèvement / rejet en °C

1,16 : Capacité calorifique volumique de l'eau en $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \times ^\circ\text{C}}$

Par conséquent, en hiver, le débit d'eau prélevé dans l'aquifère est calculé comme suit :

$$\text{Débit d'hiver } D \text{ m}^3/\text{h} = \frac{P_{\text{CH}} \text{ kW} \times (1 - \frac{1}{\text{COP}})}{1,16 \times \Delta T}$$

Pour un COP instantané de 3,5 par la température la plus basse, le débit nécessaire est donné par la formule suivante :

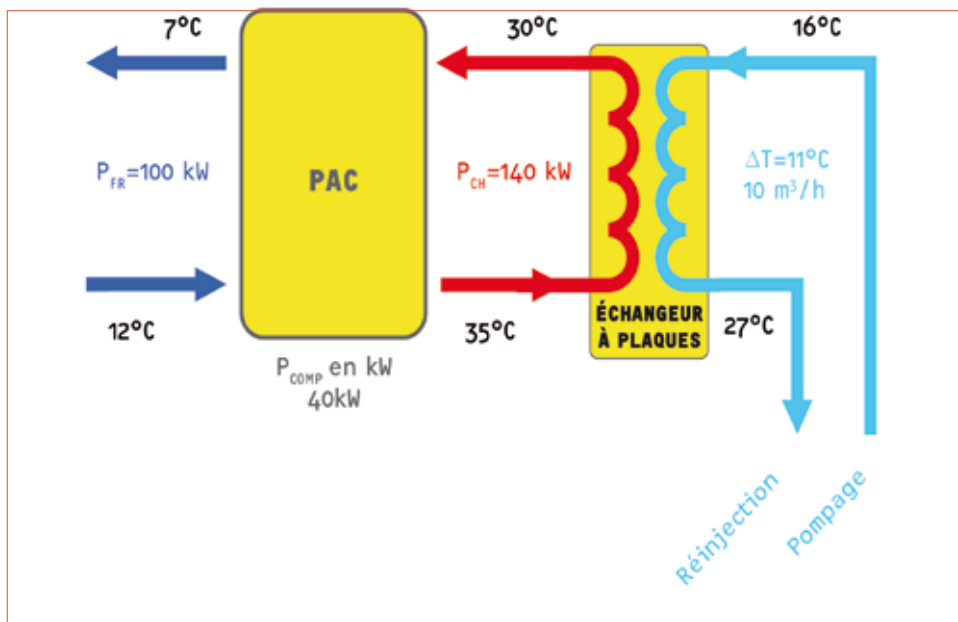
$$\text{Débit d'hiver } D \text{ m}^3/\text{h} = \frac{P_{\text{CH}} \text{ kW} \times 0,7}{1,16 \times \Delta T}$$

Une température de réinjection plus basse (avec comme limite de ne pas geler l'eau de la nappe), permet un écart de température sur l'eau de nappe plus élevé donc un débit à puiser plus faible.

Mode de fonctionnement estival (rafraîchissement)

Pour ce mode de fonctionnement, la PAC prélève de la chaleur dans le local et la réinjecte dans la nappe.

Il est nécessaire de prendre en compte les exigences réglementaires relatives à la limitation de la température de rejet et de l'écart de température prélèvement / rejet.



Exemple de dimensionnement en mode rafraîchissement.

La puissance chaud rejetée sur la nappe est donnée par :

$$P_{CH} = P_{FR} + P_{COMP}$$

Si l'on désigne par C_R le coefficient d'efficacité énergétique, la relation devient :

$$P_{CH} = \left(1 + \frac{1}{C_R}\right) \times P_{FR}$$

En tenant compte de la relation explicitée ci-dessous :

$$P_{CH} = D \times 1,16 \times \Delta T$$

le débit d'eau est donc donné par :

$$\text{Débit d'été } D \text{ m}^3/\text{h} = \frac{P_{FR} \text{ kW} \times \left(1 + \frac{1}{C_R}\right)}{1,16 \times \Delta T}$$

Pour une valeur de C_R de 3 le débit est donné par la formule suivante :

$$\text{Débit d'été } D \text{ m}^3/\text{h} = \frac{P_{FR} \text{ kW} \times 1,33}{1,16 \times \Delta T}$$

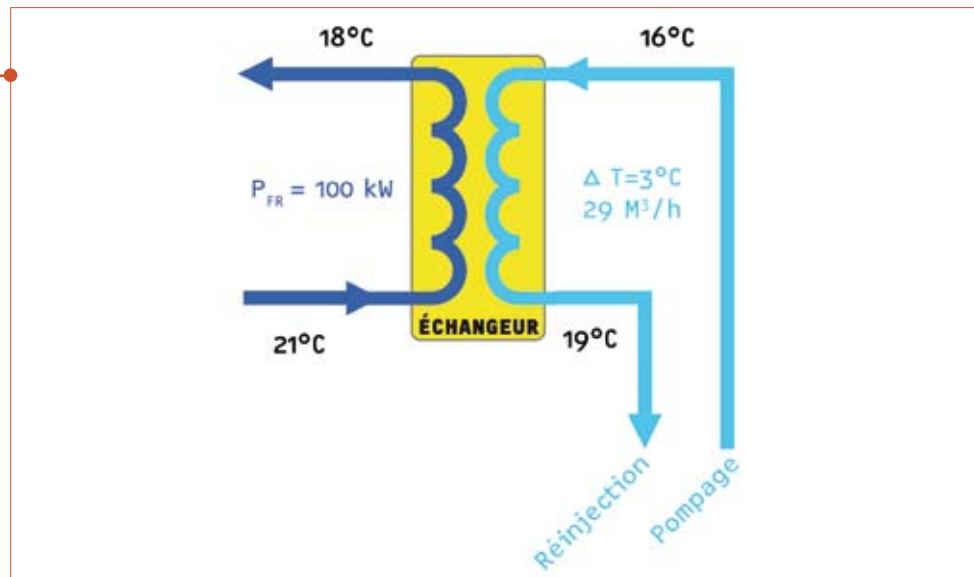
Plus le régime d'eau glacée est élevé (10/15 °C, par exemple), meilleures sont les performances des machines.

Cas particulier du rafraîchissement « gratuit » (refroidissement direct de l'eau du circuit par l'eau de nappe par la seule utilisation des échangeurs, sans mise en service de la pompe à chaleur, souvent appelé free-cooling) :

Dans ce cas, le coefficient d'efficacité énergétique est de 1, ce qui donne la relation suivante :

$$\text{Débit d'été } D \text{ m}^3/\text{h} = \frac{P_{FR} \text{ kW}}{1,16 \times \Delta T}$$

Exemple de dimensionnement en rafraîchissement direct.



Compte tenu de la température de la nappe en période estivale qui peut atteindre des valeurs jusqu'à 16 °C, cette eau peut être utilisée « directement » (l'échangeur à plaques est maintenu afin d'éviter les problèmes liés à la qualité de l'eau) pour assurer le rafraîchissement « gratuit » (sans recours aux machines frigorifiques) des locaux.

Le plancher ou le plafond chauffant/rafraîchissant sont les émetteurs de chaleur les mieux adaptés à cette utilisation.

Leur température de surface est limitée de 3 à 5 °C au-dessous de la température ambiante, afin d'éviter tout risque de condensation (transformation en liquide de la vapeur d'eau contenue dans l'air au contact de paroi à température inférieure ou égale à la température du point de rosée).

SCHÉMAS DE MONTAGE

(rafraîchissement ou climatisation, chaud et froid, free-cooling)

pompe à chaleur réversible

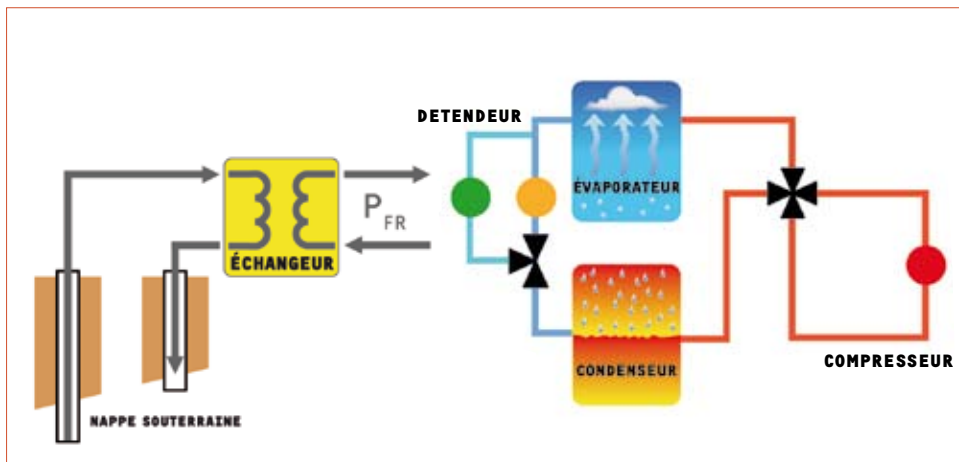


Schéma de principe général d'une PAC sur nappe.

Il existe deux configurations :

- Même puits de production été et hiver, seul le puits producteur est équipé d'une pompe d'exhaure.
- Les deux puits du doublet sont équipés d'une pompe d'exhaure. C'est le principe du puits chaud – puits froid. L'hiver, l'eau refroidie est réinjectée dans le puits froid. L'été, l'eau de rafraîchissement est prélevée au puits froid et réinjectée dans le puits chaud, après prélèvement de chaleur dans le bâtiment à rafraîchir.

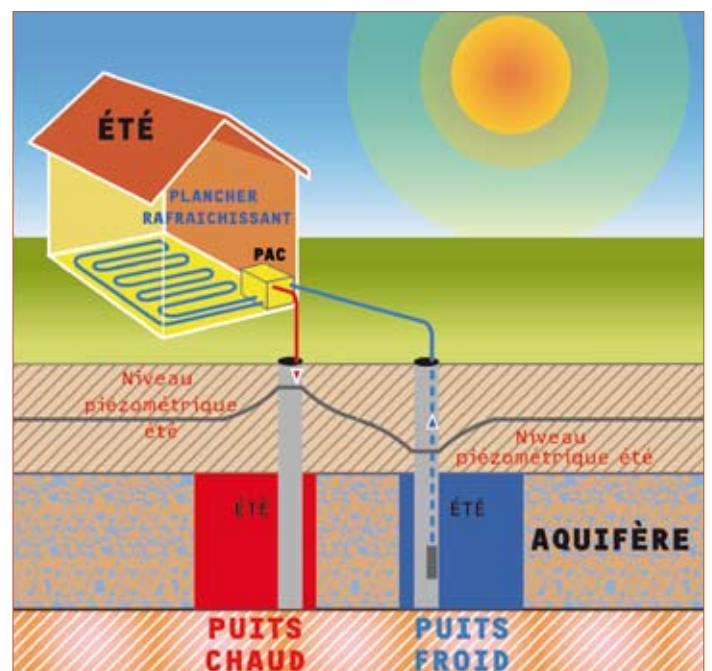
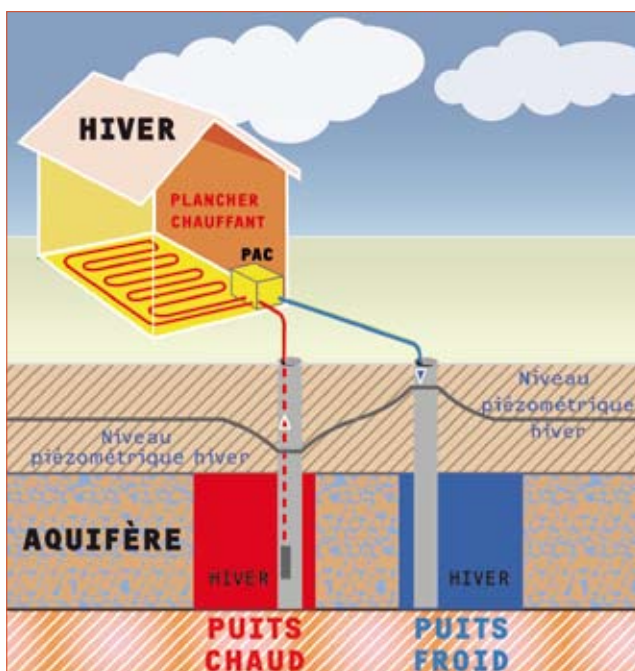
Si le faible écoulement de la nappe superficielle le permet, la constitution d'une bulle chaude au puits chaud et d'une bulle froide au puits froid augmente la performance du système qui s'améliore avec le nombre de cycles.

Ces systèmes sont envisageables lorsque l'écoulement de la nappe est faible ou inexistant.

Thermofrigopompe

Le fonctionnement en thermofrigopompe est adapté aux immeubles tertiaires ayant des besoins simultanés de chaud et de froid à satisfaire.

Schéma puits chaud - puits froid. Fonctionnement en hiver et en été.



Les schémas ci-dessous illustrent cinq cas.

Schéma chaud seulement :
la chaleur prélevée au niveau de l'aquifère (via l'évaporateur) est transférée via le condenseur au milieu à chauffer.

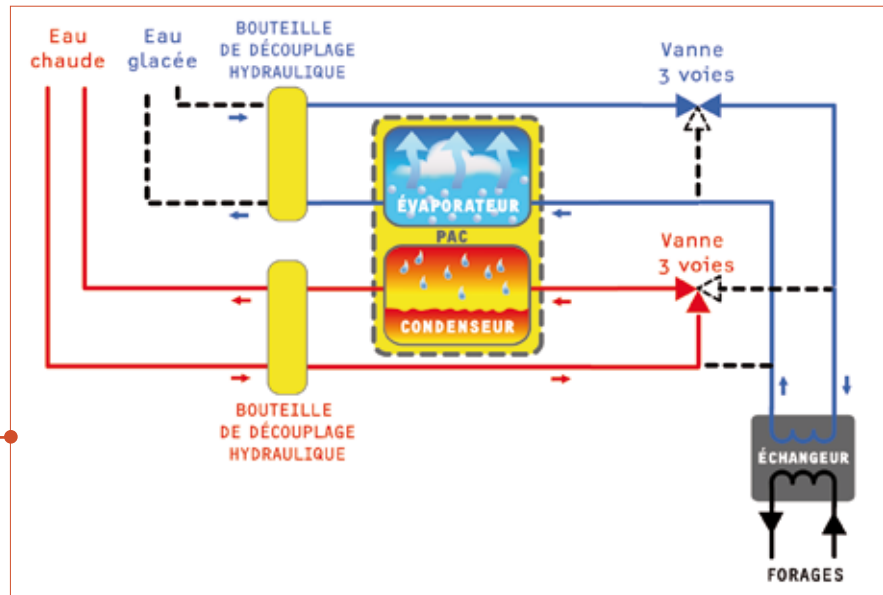


Schéma chaud et froid
(chaud > froid) :
le froid produit est excédentaire
dont une partie est réinjectée
dans l'aquifère.

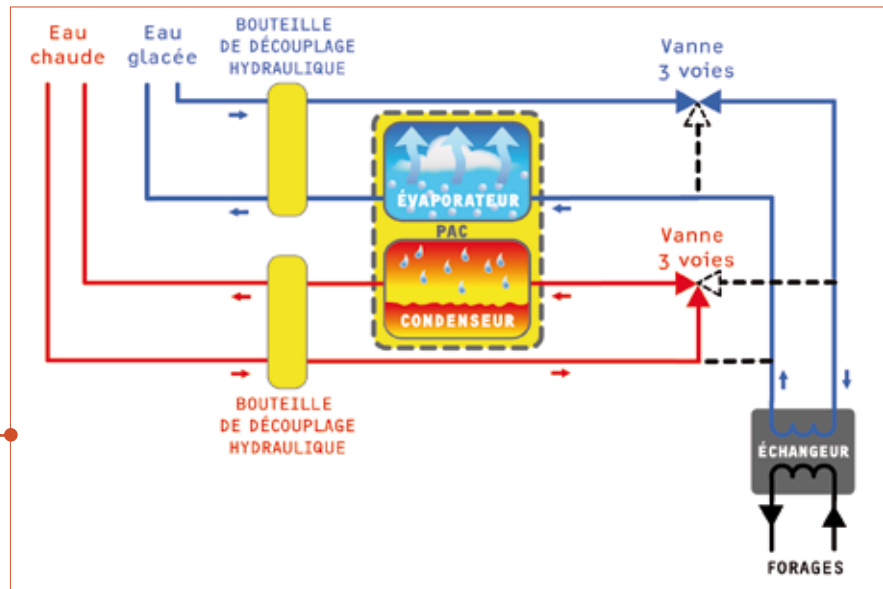
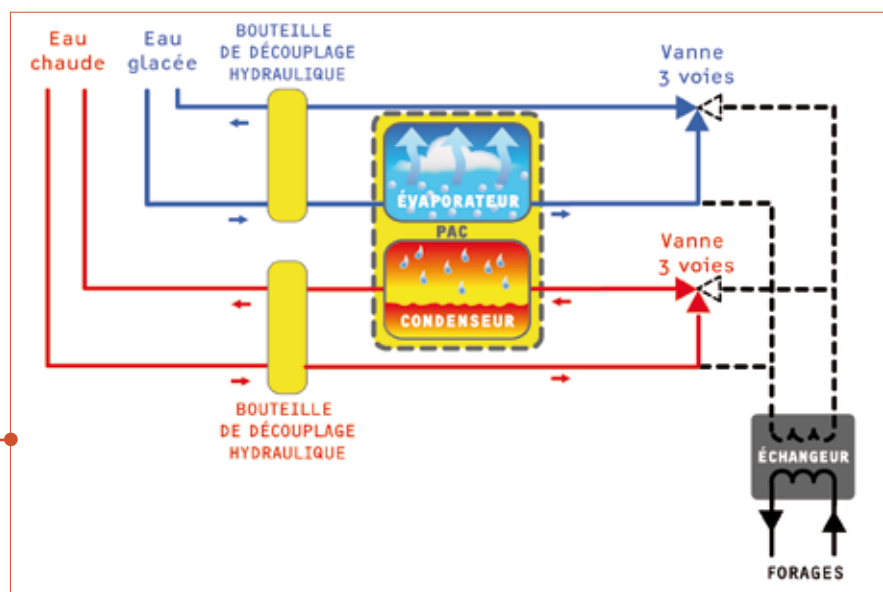


Schéma chaud et froid sans rejet
(chaud = froid) :
l'équilibre entre chaud et froid
étant réalisé, les forages ne sont
pas utilisés.



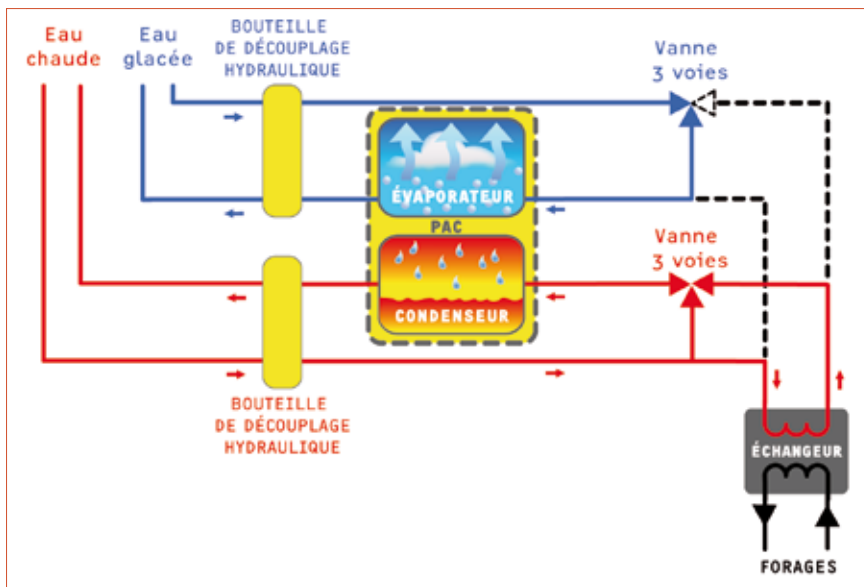


Schéma chaud et froid avec rejet chaud sur le forage (froid > chaud) : l'excédent de chaud est réinjecté dans l'aquifère.

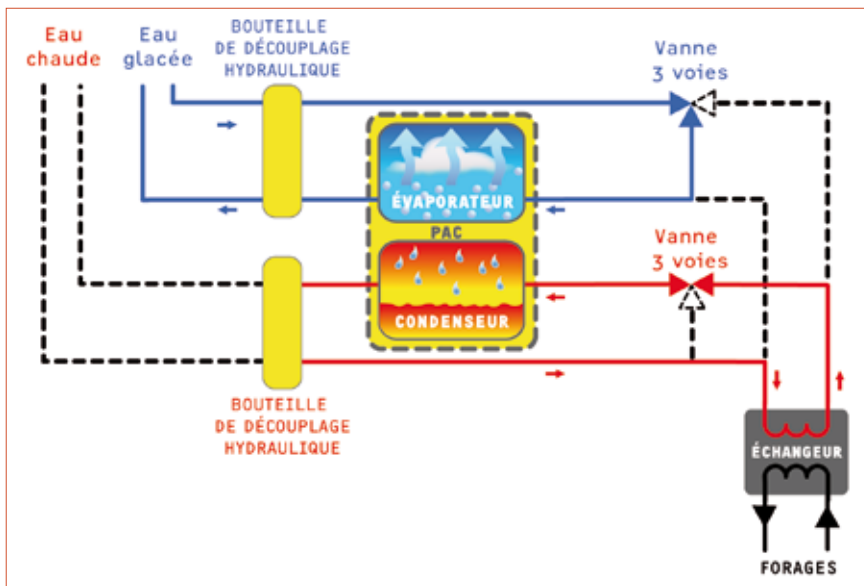


Schéma froid seulement : la chaleur évacuée des locaux est transférée à l'aquifère, via le condenseur vers le puits.

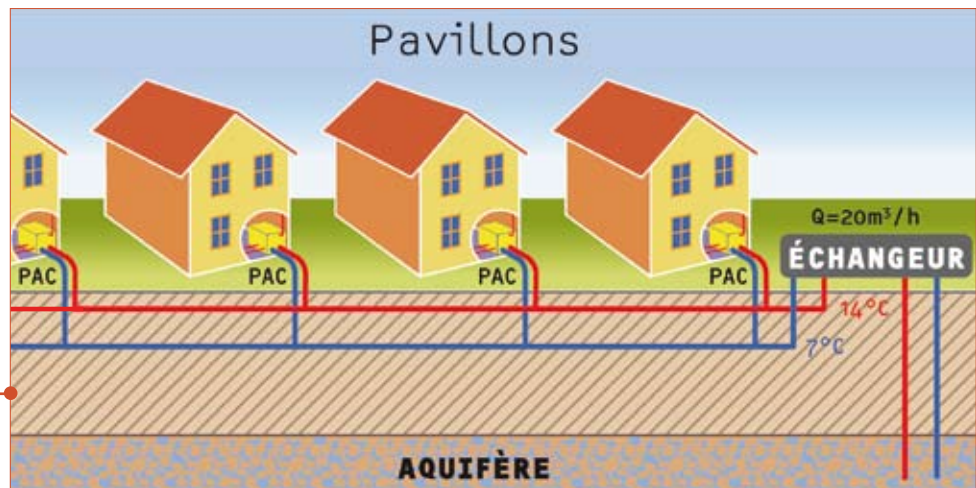
Pompe à chaleur sur boucle d'eau froide

Le système de PAC sur boucle d'eau permet d'individualiser le chauffage et le rafraîchissement de locaux et de récupérer les apports spécifiques.

Cette technique est particulièrement adaptée aux cas où les besoins sont variables selon les zones (besoins simultanés de chaud et de froid).

Une boucle d'eau parcourt l'ensemble des locaux à rafraîchir (ou à chauffer: il s'agit d'un système réversible), chaque local étant équipé d'une PAC branchée sur cette boucle. La PAC permet de transférer de la chaleur du local vers la boucle, ou de la boucle vers le local, selon le fonctionnement désiré (rafraîchissement/chauffage). La boucle d'eau permet donc un transfert d'énergie d'un local vers un autre, et sa température est fonction de l'ensemble de ces transferts. Associée à un forage, la boucle peut prélever et évacuer la chaleur selon les besoins de la période.

Le principe de la boucle d'eau peut également être envisagé dans le cas d'un lotissement de pavillons individuels. Chaque pavillon dispose de sa propre pompe à chaleur et peut prélever en tant que de besoin, hiver comme été, la quantité dont il a besoin pour le chauffage ou le rafraîchissement.



Principe de la boucle d'eau froide : chaque pavillon dispose de sa propre PAC.

BILAN ÉNERGÉTIQUE

Surface m ²	Besoins chauffage	Besoins rafraîchissement
1	80 kWh/m ²	20 kWh/m ²
10 000	800 000 kWh	200 000 kWh

Le tableau ci-dessous présente un exemple de bilan énergétique comparatif d'un immeuble de bureau de 10 000 m² ayant des besoins de rafraîchissement en été.

Le comparatif porte sur les trois configurations suivantes :

- PAC sur aquifère (température 12 °C)
- PAC air eau
- groupe froid + chaudière gaz

	Consommations	PAC eau-eau	Pac eau-eau rafraîchissement direct	PAC air-eau	Groupe froid + chaud gaz
performances	COP moyen net	3,5		2,5	
	C _{FR} moyen net	2,8		2,3	2,3
	Rend. Prod chaud				0,855
	Rend distrib.	0,855		0,855	0,81
Rend global	Chauff	2,99		2,14	0,69
	Clim	2,39		1,97	1,97
Consommations kWh	Chauffage hiver	267 335	267 335	374 269	1 161 946
	Rafraîchissement été	83 542	0	101 704	101 704
	Électricité pompage	18 750	25 000		
	Total énergie finale	369 627	292 335	475 973	101 704 (elec) 1 161 946 (gaz)

Débit de pompage maximum nécessaire : 60 m³/h

Les résultats sont indicatifs, les consommations annexes et l'électricité de pompage dépendent fortement des conditions d'exploitation de l'installation.

Il faut noter qu'une partie ou la totalité du rafraîchissement, dans la solution PAC eau - eau, peut être réalisée par échange direct si les émetteurs sont adaptés (planchers ou plafonds). Le débit de 60 m³/h peut, par échange direct, fournir une puissance froid >400 kW qui est largement suffisante.

Le bilan en énergie finale est largement favorable à la solution PAC eau - eau par rapport à une solution de référence (gaz + groupe froid).

Mise en œuvre d'une solution PAC sur aquifère

Outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur géothermiques sur aquifère, l'exemple de l'Ile-de-France	36
Principales caractéristiques de l'aquifère	36
Analyse hydrogéologique du site	36
Techniques de forages	37
Configuration générale des ouvrages	38
Équipements du forage	38
Développement et essais	41
Conditions de rejet des eaux	42
Analyse comportementale de la nappe	42



Mise en œuvre d'une solution PAC sur aquifère

OUTIL D'AIDE A LA DÉCISION POUR L'INSTALLATION DE POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES SUR AQUIFÈRE, L'EXEMPLE DE L'ÎLE-DE-FRANCE

(CONSULTABLE SUR LE SITE www.geothermie-perspectives.fr)

L'outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur aquifère a été élaboré par le BRGM, en 2006-2007 pour l'Île-de-France en partenariat avec l'ADEME, l'ARENE et EDF. Son objectif est de mettre à disposition de l'utilisateur un instrument simple, qui permette de visualiser les caractéristiques d'exploitabilité géothermiques de la région Île-de-France, avec notamment la possibilité d'afficher les données sous forme chiffrée (boîtes de dialogue) mais également cartographique (accès à différents niveaux d'échelles). L'interface graphique permet d'obtenir en tout point, une évaluation sommaire des principales caractéristiques des différents aquifères existants sur un site donné.

Principales caractéristiques de l'aquifère

Profondeur de la cible (m) : Il s'agit de distinguer la profondeur de la nappe (surface piézométrique) mesurée depuis la surface topographique (terrain naturel), de la profondeur du toit de l'aquifère lui-même, déterminée par sa géométrie.

Remarque : en présence de nappe captive sous pression, la profondeur de la nappe est le niveau statique atteint après forage (la profondeur de la nappe est, dans ce cas, inférieure à celle du toit de l'aquifère).

Rappel : le critère de la profondeur de la cible est déterminant à la fois en termes d'exploitabilité – dans la mesure où elle influence directement la hauteur de refoulement de l'eau pompée (conséquences sur le choix du type de pompe et sur le coût de l'énergie de pompage) – et en termes de coût (directement lié à la profondeur forée).

Épaisseur (m) : par exemple, de 1 à 10 m

Il s'agit de l'épaisseur de la zone saturée (épaisseur mouillée de la formation aquifère ou hauteur moyenne de la zone noyée située sous la surface piézométrique de l'aquifère).

Débit potentiel (m³/h) : par exemple, de 2 à 10 m³/h

Remarque : la plage de débit proposée est indicative. Une étude de faisabilité préalable à la réalisation de l'opération reste toujours nécessaire. Les débits potentiels ont été estimés à partir des valeurs de transmissivité, transformées en débits spécifiques.

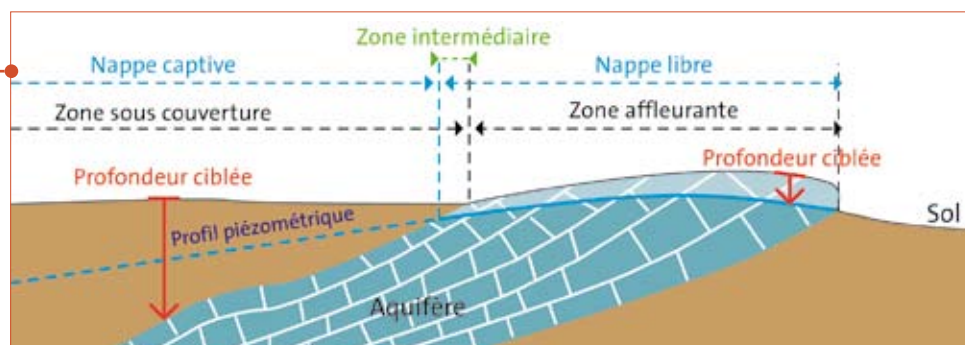
* **Dureté de l'eau :** elle s'exprime en degrés français (°f). Un °f correspond à 4 mg de calcium et à 2,4 mg de magnésium par litre d'eau.

Minéralisation : par exemple, nappe moyennement minéralisée

Rappel : l'échelle d'évaluation de la minéralisation est la suivante :

- fortement minéralisé : dureté* > 32 °f,
- moyennement à fortement minéralisé : dureté comprise entre 22 – 32 °f,
- moyennement minéralisé : dureté < 22 °f.

Principales caractéristiques d'un aquifère.



Analyse hydrogéologique du site

Cette étape consiste principalement à identifier le potentiel du sous-sol et de la ressource. Pour statuer de manière plus précise sur les possibilités de recourir à l'aquifère pour les usages concernés, il est indispensable de faire appel à un spécialiste en hydrogéologie qui définira en fonction du débit d'eau souterraine nécessaire :

- l'**existence d'une nappe suffisante** au droit du projet ;
- la **profondeur** de la nappe et la **nature** du réservoir à capter ;
- le **comportement** probable de la nappe ;
- le **nombre d'ouvrages** nécessaires et leurs influences réciproques ;
- les **possibilités de rejet** et l'évaluation du risque de recyclage thermique entre production et réinjection en fonction de l'usage prévisionnel de l'eau ;
- la **chimie précise** de l'eau ;
- la **compatibilité** du projet avec les autres usages de la nappe.

À partir de ces données de base, le concepteur de l'ouvrage intervient pour définir :

- le nombre de forages nécessaires à l'installation en fonction de la productivité prévisionnelle par ouvrage,
- la distance minimale entre les ouvrages en fonction des influences réciproques des forages,
- le choix du diamètre du forage,
- la puissance de la pompe et son diamètre,
- le diamètre de la chambre de pompage,
- la technique de forage appropriée suivant la lithologie (terrain dur, terrain bouillant, terrain tendre, etc.),
- le type d'ensemble crépine + massif à mettre en place (diamètre d'ouverture de crépine, résistance mécanique des tubages),
- la nature de l'eau captée déterminera le type de matériaux à utiliser ou ceux à proscrire.

Ce travail doit être réalisé par des personnes compétentes maîtrisant bien la complexité et l'opération dans son ensemble.

TECHNIQUES DE FORAGES

Différentes techniques de forage existent. Chacune présente des particularités propres qui sont décrites ci-après. On peut se référer à la norme **AFNOR expérimentale*** homologuée **NF X10-999** du 27/04/07 accompagnée du fascicule **FD X10-980**.

Méthode au battage

Cette méthode est très ancienne et a été utilisée pour tout type de terrains. La roche est attaquée à l'aide d'un outil affûté très lourd (outil généralement en croix) que l'on laisse tomber de son propre poids et que l'on remonte à l'aide d'un câble ou de tiges. Cette opération est répétée maintes et maintes fois. Le battage est généralement utilisé pour la réalisation de puits dans les formations d'alluvions, formations meubles et peu profondes.

Méthode du havage

Le forage par havage est assez peu différent du battage. La roche est attaquée par une benne circulaire munie de coquilles ouvertes qui percutent le sol comme un trépan. Cette technique largement utilisée en génie civil est également utilisée pour la réalisation de forages d'eau. Le havage est utilisé principalement dans les formations alluviales meubles de faible profondeur.

Méthode du forage à la tarière

Cette méthode utilisée en génie civil est également utilisée pour les forages d'eau. Le terrain est broyé et remonté à l'aide d'une tarière hélicoïdale (hélice sans fin s'il s'agit d'une tarière continue) en rotation. Elle n'est adaptée qu'aux terrains meubles alluvionnaires ou sableux ou crayeux meubles ne présentant pas de difficultés particulières. Elle s'utilise pour des ouvrages de faible à moyenne profondeur.

NB : les aspects réglementaires concernant le sous-sol sont présentés au chapitre « montage administratif, juridique et financier ».

* Cette norme expérimentale devrait être transformée en norme AFNOR définitive en 2008.

Méthode du forage au Rotary

Cette technique de forage est très répandue en Ile-de-France. Le terrain est broyé à l'aide d'un outil à molette en rotation. Les déblais de forage sont remontés par un fluide de forage (boue) injectée par l'intérieur des tiges de forage passant par le pied de l'outil et remontant entre les tiges et le terrain en entraînant les déblais. Le Rotary permet de forer dans tous les types de terrains. Cette technique est assez rapide et peut être utilisée jusqu'à de très grandes profondeurs.

Méthode du forage au marteau fond de trou

Cette technique de forage, la plus récente, est assez souvent utilisée en Ile-de-France. Elle consiste à attaquer la roche à l'aide d'un marteau percutant pneumatique. Le marteau pneumatique est descendu au fond du forage. Il est actionné par de l'air comprimé envoyé par l'intérieur du train de tige par des compresseurs puissants. Le marteau fond de trou est la technique qui offre les vitesses d'avancement les plus rapides. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux terrains durs, et peu efficace en terrains argileux. Le marteau fond de trou permet de forer à des profondeurs importantes.

CONFIGURATION GÉNÉRALE DES OUVRAGES

Dans une installation de pompe à chaleur sur nappe, les puits sont des constituants essentiels du dispositif dans la mesure où ils permettent de fournir et de rejeter (dans le cas d'une réinjection en nappe) l'eau nécessaire aux échanges thermiques. Ce sont des ouvrages d'art, dont la conception et la réalisation doivent être parfaitement maîtrisées par des opérateurs compétents. La mise à disposition d'eau souterraine dans des conditions appropriées résulte à la fois des qualités intrinsèques de la nappe, de l'ouvrage de prélèvement et, le cas échéant, de l'ouvrage de réinjection, de leur complétion, de leur développement et de leur équipement. À ce titre, l'ingénierie sous-sol constitue le fondement du fonctionnement de l'installation.

La garantie de qualité et de pérennité de l'ouvrage est conditionnée par :

- Le choix d'équipements appropriés : cuvelages, tubages, crépines, drains, etc.
- Les caractéristiques des matériaux tubulaires adaptées à l'ouvrage, aux milieux traversés et à la qualité des eaux souterraines : épaisseur, résistance à la pression et à la corrosion.
- Les techniques d'exploitation : mise en route et arrêt des pompes et suivi.

ÉQUIPEMENTS DU FORAGE

Tubages

• **Les tubages en acier** doivent respecter des normes de qualité liées à leur résistance mécanique. Ils sont résistants mais ils peuvent être corrodés par l'eau.

Les aciers inoxydables ont un coût élevé. On doit veiller à l'homogénéité de l'acier utilisé pour les tubages et les crépines sous peine de voir apparaître un effet de pile pouvant entraîner des dommages importants au matériel tubulaire et à terme la destruction du forage. Les éléments de tubages et/ou crépines sont soudés ou vissés.

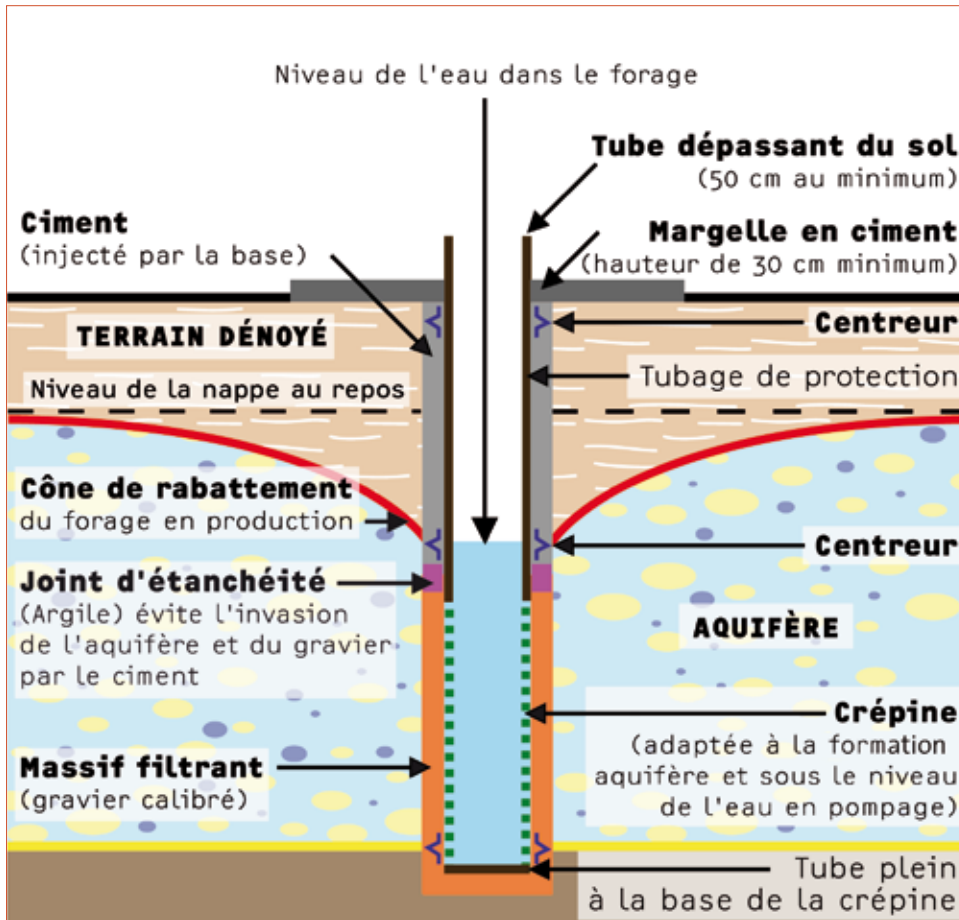
• **Les tubages en PVC** sont très utilisés en raison de leur résistance à la corrosion, de leur coût plus faible que celui de l'acier, de la facilité de manipulation et d'assemblage des éléments de tubage ou de crépine. Les éléments sont vissés ou collés.

Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés pour les forages profonds. Leur flexibilité exige l'utilisation de centreurs. Au-dessus du niveau de l'eau, le PVC vieillit ; il peut se fendre et son diamètre légèrement diminuer. Les cimentations annulaires peuvent donc ne plus assurer une étanchéité satisfaisante.

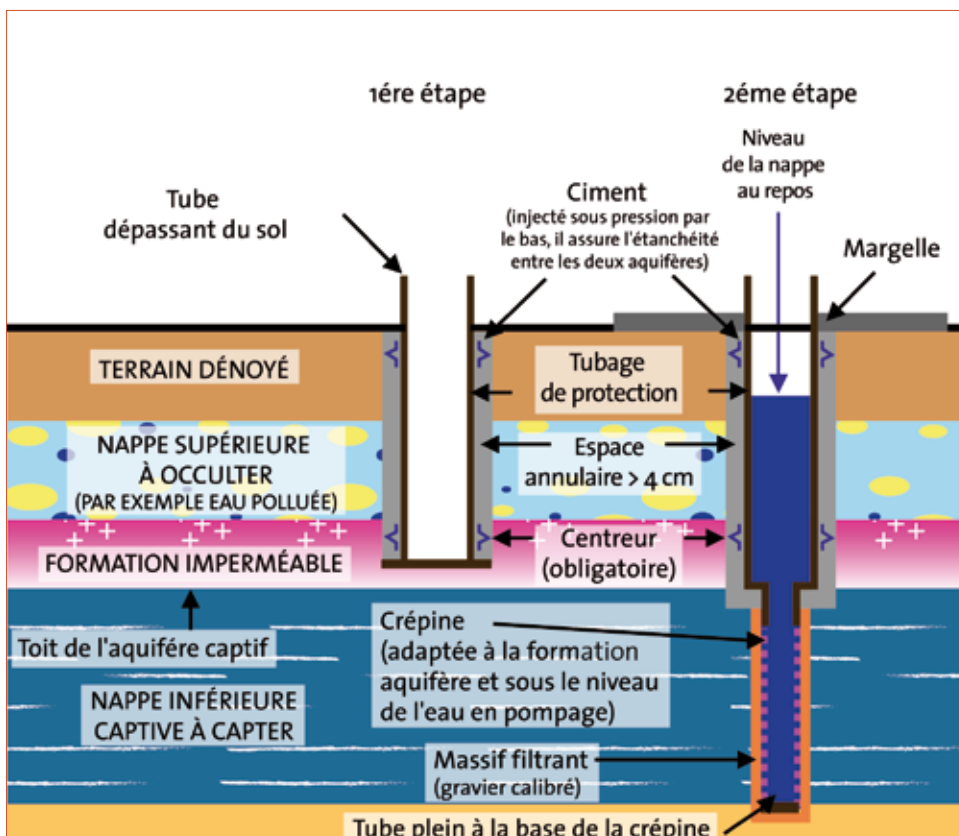
• **L'inox** est également utilisé en forage, notamment en forage d'eau potable. Il présente l'avantage d'être très peu sensible à la corrosion.

Le coût des tubages en inox est nettement plus élevé que celui des autres matériaux, ce qui explique son utilisation peu fréquente.

Configuration des forages



Forage en nappe libre :
cette configuration est la plus courante pour les forages de petit diamètre (de 150 à 250 mm). Le forage, excepté pour la hauteur de l'avant-tube, est réalisé en une seule passe jusqu'à la formation aquifère.



Forage en nappe captive :
dans ce cas, l'ouvrage est réalisé en deux étapes avec aveuglement par cimentation axiale sous pression par le bas au niveau de la couche imperméable séparant les deux aquifères. Après un temps de prise de 24 à 48 heures minimum, le forage est poursuivi en diamètre réduit dans la nappe inférieure à capter.

Crépines

La crépine a pour fonction d'assurer la production d'eau sans venue de sable en induisant des pertes de charge minimales. Elle doit résister à la corrosion et à la pression et avoir une longévité maximale. Les types de crépines sont déterminés suivant la forme et le pourcentage de vides pour allier résistance et vitesse de l'eau dans les ouvertures.

Différents types de crépines :

Crépine à trou oblong

Ouverture : 15 à 20 %



Crépine à ponts

Ouverture : 6 à 20 %



Crépine à fil enroulé

Ouverture : 25 à 30 %



Tubage lanterné

à proscrire



Pompage

Le choix de la **pompe de puisage** a une grande importance sur les coûts de fonctionnement de ce type de solution. En effet, en fonction de la profondeur du forage, la puissance électrique de la pompe est plus ou moins importante.

En fonction des caractéristiques hydrogéologiques, de la géométrie du forage et du régime d'exploitation envisagé, le choix de la pompe peut être arrêté sur :

- une **pompe de surface** pour les nappes à faible niveau statique et dynamique sous le sol (de quelques mètres seulement) ;
- une **pompe immergée** pour les nappes à niveau statique plus profond ou ayant une faible productivité en cours d'exploitation.

La pompe immergée peut être, soit suspendue à une colonne d'exhaure, soit entraînée depuis un moteur en surface et un axe vertical.

Il est nécessaire de prévoir un **moteur à vitesse variable** pour protéger l'installation et pour limiter les consommations électriques.

Il convient de placer un **compteur d'eau** sur le forage, cela permet de mesurer les débits pompés.

Filtration

Il est impératif de placer un filtre avant l'échangeur (voire deux pour faire la maintenance) afin d'arrêter les particules en suspension dans l'eau géothermale qui sont fréquemment rencontrées au démarrage de l'installation. Ces filtres doivent être dimensionnés en fonction du type d'échangeur installé (dans le cas d'un échangeur en Inox une filtration à 500 microns est bien souvent suffisante).

Échangeurs

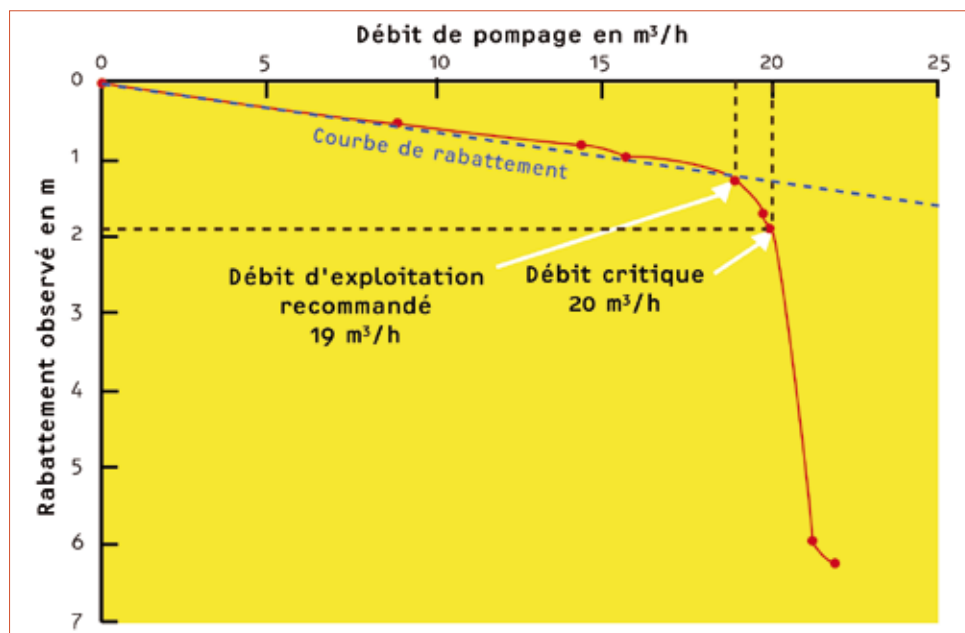
Les échangeurs doivent être en Inox *a minima* en 316L, voire plus si l'analyse d'eau indique la présence d'une eau fortement corrosive.

DÉVELOPPEMENT ET TEST HYDROGÉOLOGIQUE

Une fois équipé, le forage ne donne que très rarement son débit optimal. Il est donc nécessaire de réaliser une opération de développement qui a pour but :

- de nettoyer le forage des déblais restant ;
- de faciliter le passage de l'eau en éliminant les petites particules qui bouchent les interstices ou les fractures.

Le développement a aussi pour but d'exploiter l'ouvrage pendant quelques heures à un débit supérieur à celui prévu pour l'exploitation future afin d'extraire les particules fines de l'ouvrage. Exploité ensuite à un débit plus faible (engendrant des vitesses plus modérées) l'ouvrage ne doit plus ensuite délivrer de particules fines.



La courbe de rabattement permet de définir le débit maximal d'exploitation.

Une fois le forage réalisé et nettoyé deux types de test hydrogéologique sont réalisés:

- Les **essais par paliers** : (essai de puits) : ils sont réalisés par pompage par paliers de débits croissants. Ils permettent de contrôler le fonctionnement de l'ouvrage et de fixer le débit maximal de pompage. La durée de chaque palier est de l'ordre de 5 heures.

- Le **pompage de longue durée** (essai de la nappe) : il est réalisé au débit prévisionnel d'exploitation et prolongé pendant plusieurs jours (par exemple 72 heures). Il permet d'évaluer le comportement de la nappe en pompage et de connaître ses limites et l'évolution du rabattement en pompage prolongé.

CONDITIONS DE REJET DES EAUX

Après utilisation de l'eau pour l'usage thermique, il faut trouver un exutoire capable de recevoir les débits et les volumes utilisés. La voie normale est le rejet dans l'aquifère d'origine.

Le rejet dans l'aquifère d'origine

Le rejet dans l'aquifère d'origine est la solution qui, du point de vue de l'environnement, est sous certaines conditions la plus satisfaisante.

En effet, il y a restitution de l'eau à son milieu d'origine ce qui se traduit par un bilan prélèvement – restitution égal à zéro. Ce type d'installation ne remet donc pas en cause la gestion quantitative des stocks d'eau souterraine. Il va sans dire que **le rejet doit être réalisé dans la même nappe que celle où a lieu le prélèvement** ; la réinjection dans une autre nappe est interdite par la réglementation.

Dans ce cas-là, il est nécessaire de calculer la distance entre les puits qui permettra d'éviter une interférence thermique et hydraulique entre le puits de production et le puits de réinjection. Il conviendra alors de tenir compte de l'écoulement naturel de la nappe d'eau souterraine.

Le rejet en surface

Le rejet des eaux en surface doit être exceptionnel et nécessite des autorisations spécifiques. Cette solution implique le paiement de taxes et redevances supplémentaires.

ANALYSE COMPORTEMENTALE DE LA NAPPE

La faisabilité technique du rejet doit être étudiée et notamment les risques de recyclage thermique ou de dérive thermique des doublets. En effet, le fait de réinjecter une eau à une température différente de celle de la nappe (l'écart de température est en général de l'ordre de 5 à 7 °C en cas de production de chaleur et de 10 à 12 °C pour la production de froid avec PAC réversible) modifie la température de la nappe à proximité du point de rejet. Cette bulle d'eau dont la température est modifiée s'étend au cours du temps, en fonction de la quantité d'eau injectée et de l'écoulement de la nappe. Il est donc important que cette perturbation n'atteigne pas le point de production trop rapidement ou que la perturbation ne soit pas trop importante.

Cette perturbation dépendra de plusieurs paramètres :

- les volumes injectés et leur température ;
- le sens d'écoulement de la nappe et sa vitesse de déplacement ;
- l'épaisseur de l'aquifère, le fait qu'il soit monocouche ou multicouche ;
- la conductivité thermique des terrains ;
- la disposition du doublet.

Parmi ces paramètres, le seul qu'il est possible de choisir (dans la limite des contraintes de surface), hormis ceux liés aux besoins, est la disposition du doublet. La distance entre les deux forages est très importante ; elle influe selon une loi de type carré. Les calculs permettent d'estimer la distance minimum à respecter entre les deux forages, la distance la plus grande possible étant bien souvent la meilleure option.

Il est également nécessaire de placer le forage de rejet en situation aval par rapport au point de production, afin que la bulle thermique modifiée soit évacuée par l'écoulement naturel de la nappe en dehors de la zone de production. Il est également souhaitable de prendre en compte l'existence de points de réinjection d'un autre doublet à proximité.

Exploitation et maintenance

Surveillance et entretien des installations de surface (pompe à chaleur)	44
Surveillance et entretien des ouvrages de sous-sol (forage, équipements d'exploitation).....	45



Exploitation et maintenance

SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES INSTALLATIONS DE SURFACE

Toute installation de génie climatique requiert une maintenance tant préventive que curative pour contribuer à :

- la fiabilité de fonctionnement et la « continuité de service »,
- la performance énergétique.

Il est indispensable pour le maître d'ouvrage de souscrire dès la mise en service de l'installation un (ou des) contrat(s) d'entretien couvrant l'intégralité des installations de forages et de génie climatique.

En dehors des forages et équipements afférents (pompes, instrumentation), la maintenance des installations de pompes à chaleur est analogue à celle des groupes frigorifiques.

La fréquence d'intervention sur la ou les pompes à chaleur peut être supérieure à celle concernant le(s) groupe(s) « froid seul », mais elle est à comparer à la maintenance requise par une solution du type chaufferie + groupe froid.

Les principales opérations de maintenance sont les suivantes :

Pompe à chaleur

Une visite périodique est à prévoir : a minima, 2 fois par an.

Vérification :

- de l'état d'encrassement des filtres, de l'évaporateur et du condenseur,
- du fonctionnement des voyants et des dispositifs de contrôle et d'alarme,
- du niveau d'huile, de la pression de fonctionnement, des intensités de démarrage et nominale.

Entretien préventif :

- vérification de la charge en fluide frigorigène et de l'étanchéité du circuit,
- réglage du détendeur,
- vérification et réglage des sécurités (HP, BP, vanne d'inversion de cycle).

SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES OUVRAGES DE SOUS-SOL (FORAGE ET ÉQUIPEMENTS D'EXPLOITATION)

Au même titre que les autres éléments de l'installation, les ouvrages de sous-sol (forage, équipement de pompage, colonne d'exhaure, appareillages de mesure et de régulation, traitement des eaux, etc.) doivent faire l'objet d'une surveillance adaptée et régulière, et éventuellement d'un entretien préventif.

Paramètres à prendre en compte

Le programme de surveillance doit être défini en fonction d'un certain nombre de paramètres tels que :

- le type d'aquifère capté ;
- les conditions d'utilisation du doublet (périodicité, débit) ;
- les résultats obtenus lors des essais préliminaires ;
- les moyens de surveillance « automatiques » mis en place éventuellement à la demande des services de la police de l'eau.

Conditions d'une surveillance efficace

Pour permettre et réaliser une surveillance rapide et efficace, il est nécessaire que :

- l'installation soit équipée d'un instrument de mesure de débit (compteur, débitmètre),
- les forages (puits producteur et injecteur) soient équipés des instruments de mesure nécessaires ou qu'ils puissent permettre leur mise en place régulière,
- l'on puisse procéder à des prélèvements de l'eau pompée avant filtration (piquage avec vanne).

Contrôles périodiques à effectuer

D'une manière générale et pour une installation fonctionnant toute l'année, une surveillance et des mesures périodiques doivent être effectuées sur les points suivants :

- Contrôle des caractéristiques hydrodynamiques de chacun des forages : test hydraulique rapide réalisé au moyen de l'installation en place, détermination des nouvelles caractéristiques ;
- Niveaux d'eau (niveaux statique et hydrodynamique) pour le puits producteur ;
- Tracé de la courbe caractéristique (« courbe de rabattement » pour le forage de prélèvement) ;
- Test de réinjection : l'analyse de la courbe caractéristique et des tests de réinjection permet de détecter les colmatages éventuels des ouvrages et d'engager les actions préventives et curatives ;
- Contrôle des paramètres physico-chimiques des eaux pompées et rejetées : mesure de la température, du pH et de la conductivité ;
- Contrôle de la qualité de l'eau : contrôle visuel d'un échantillon prélevé avant filtration, contrôle de la présence de dépôts dans le filtre. En cas de doute sur la qualité de l'eau pompée, réalisation d'analyses d'eau adaptées (analyse physico-chimique, recherche de paramètres particuliers, analyse bactériologique...).

En complément de ces mesures, il est nécessaire de prévoir des inspections endoscopiques des forages si nécessaire, ou périodiquement (par exemple tous les 5 ou 10 ans).

Pour plus de facilité, ces inspections doivent être réalisées lors des opérations de remplacement des pompes.

Entretien

Les opérations d'entretien sur des forages de captage et de réinjection sont déterminées en fonction des observations réalisées lors des opérations de surveillance (chute du débit spécifique, venues de sable...).

Montage administratif, juridique et financier

Aspects réglementaires	48
Le code minier	48
Le code de l'environnement (loi sur l'eau).....	49
Le code de l'environnement (installations classées)	50
Le code de la santé publique.....	51
Procédures incitatives (Aquapac, aléas, garantie de recherche, pérennité, mécanismes financiers, dispositifs fiscaux, autres mécanismes financiers).....	51



Montage administratif, juridique et financier

Important :

La réglementation évoluant régulièrement, se référer au site : www.geothermie-perspectives.fr

ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Les principaux textes réglementaires qui s'appliquent aux opérations de pompes à chaleur sur nappe sont :

- **Le code minier (en particulier titre V) ;**
- **Le code de l'environnement (livre II, titre 1er « loi sur l'eau » ou livre V, titre 1er « installations classées pour la protection de l'environnement ») ;**
- **Le code de la santé publique (en particulier dans le cas des opérations mixtes où l'eau extraite est également destinée à un usage alimentaire).**

Les opérations de pompe à chaleur sur nappe relèvent soit du code minier (si elles exploitent une nappe considérée comme un gîte géothermique au sens du code minier), soit du code de l'environnement (si elles exploitent une nappe qui n'est pas considérée comme un gîte géothermique au sens du code minier).

En application de l'article 3 du code minier, «sont également considérés comme mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre, dits gîtes géothermiques, dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et vapeurs souterraines qu'ils contiennent».

La définition de gîte géothermique au sens du code minier va être établie précisément par le ministère de l'industrie au cours de l'année 2008. De même, les limites entre code minier et code de l'environnement vont être clarifiées et précisées.

Important : dans tous les cas, même si l'opération n'exploite pas un gîte géothermique au sens du code minier, l'article 131 du code minier impose l'obligation de déclaration préalable à la DRIRE à tout maître d'ouvrage réalisant un forage dont la profondeur dépasse 10 m, quelle que soit sa destination. Toutefois, l'autorisation ou la déclaration au titre du code de l'environnement « loi sur l'eau » vaut déclaration au titre de l'article 131 du code minier.

Le code minier

Cas où la nappe est considérée comme un gîte géothermique au sens du code minier

Permis d'exploitation

L'exploitation de gîtes géothermiques à basse température (les températures de leurs eaux mesurées en surface au cours des essais du forage d'exploration sont inférieures ou égales à 150 °C) est soumise à l'obtention d'un permis d'exploitation minier accordé par le préfet après enquête publique (code minier, articles 98-103 et décret n°78-498).

La réglementation minière prévoit toutefois une dérogation à ces règles, lorsque deux conditions sont remplies (article 17 du décret n°78-498 du 28 mars 1978) :

- La profondeur des forages est inférieure à **100 m**.
- Le débit calorifique maximal possible calculé par référence à une température de 20 °C est inférieur à **200 thermies par heure**.

Si ces DEUX conditions sont remplies, on parle alors d'exploitation géothermique à basse température de minime importance. Ce type d'exploitation n'est pas soumis à l'obtention d'un permis d'exploitation mais à déclaration.

Cette déclaration doit être faite à la DRIRE, au plus tard un mois avant la réalisation des travaux, par lettre recommandée avec accusé de réception. Elle tient lieu de la déclaration prévue à l'article 131 du code minier (et l'article 17 du décret 78-498 du 28 mars 1978).

Concession minière

L'exploitation de gîtes à haute température (les températures de leurs eaux mesurées en surface au cours des essais du forage d'exploration sont supérieures à 150 °C) est soumise à l'obtention d'une concession minière délivrée par décret en Conseil d'État (code minier, notamment titres II et III et décret n°95-427). Pour ces gîtes, il s'applique le décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

Demande d'autorisation de travaux

L'ouverture de travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques (en particulier la réalisation de forages) est soumise à autorisation au titre du code minier (article 3.3 du décret n°2006-649).

Comme en matière de forages, il est donné acte de la déclaration et il est demandé au pétitionnaire de communiquer, à l'issue des travaux, la coupe géologique des terrains au Service géologique régional (BRGM) afin d'alimenter la Banque de données du Sous-Sol (BSS).

Le code de l'environnement « loi sur l'eau »

Cas où la nappe n'est pas considérée comme un gîte géothermique au sens du code minier (livre II, titre 1^{er})

Usage domestique de l'eau (décret n°93-743 du 29 mars 1993 modifié, article 3)

Constituent un usage domestique de l'eau ou assimilé :

1. Les prélèvements et les rejets destinés exclusivement à la satisfaction des besoins d'une famille (alimentation humaine, hygiène, lavage et productions végétales ou animales réservées à la consommation familiale).

2. Tout prélèvement inférieur ou égal à **1 000 m³/an**, ainsi que tout rejet d'eaux usées domestiques dont la charge brute de pollution organique est inférieure ou égale à **1,2 kg de DBO₅***.

Tout prélèvement, puits ou forage réalisé à des fins d'usage domestique de l'eau doit faire l'objet d'une **déclaration** auprès du maire de la commune concernée. Les informations relatives à cette déclaration sont tenues à disposition du représentant de l'Etat dans le département et des agents des services publics d'eau potable et d'assainissement (Art. L. 2224-9 du code général des collectivités territoriales).

* DBO₅ : demande biologique en oxygène sur 5 jours (mesure de la teneur en matière organique dégradable).

Usage non domestique de l'eau (en particulier si prélèvement > 1 000 m³/an).

À partir de 1 000 m³/an d'eau prélevée (qu'il y ait réinjection de l'eau ou non), les opérations de PAC sur nappe sont **soumises à déclaration ou à autorisation au titre de la loi sur l'eau**.

Une nomenclature précise les opérations soumises à déclaration ou à autorisation.

L'annexe du décret n°93-743 modifié qui s'intitule «nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application des articles L214-1 à L214-3 du code de l'environnement) précise les ouvrages soumis à déclaration **indépendamment des débits prélevés** (rubrique 1.1.1.0) et les ouvrages soumis à déclaration ou autorisation **en fonction des débits prélevés** (rubrique 1.1.2.0, 1.2.1.0, 1.2.2.0, 1.3.1.0).

Les rubriques suivantes sont applicables aux opérations de PAC sur nappe :

• La rubrique **1.1.1.0** concerne tout sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique,

exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau. Ces ouvrages sont soumis à déclaration.

- La rubrique **1.1.2.0** concerne tous les prélèvements permanents ou temporaires issus d'un forage, puits ou ouvrage souterrain dans un système aquifère, à l'exclusion de nappes d'accompagnement de cours d'eau, par pompage, drainage, dérivation ou tout autre procédé, le volume total prélevé étant :
 - Supérieur ou égal à **200 000 m³/an** : demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau ;
 - Supérieur à **10 000 m³/an** mais inférieur à **200 000 m³/an** : déclaration au titre de la loi sur l'eau.

Exceptions liées aux prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L. 214-9 du code de l'environnement.

- La rubrique **1.2.1.0** concerne les prélèvements dans un cours d'eau, dans sa nappe d'accompagnement ou dans un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe :
 - D'une capacité totale maximale supérieure ou égale à **1 000 m³/h** ou à **5 %** du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau : demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau ;
 - D'une capacité totale maximale comprise entre **400** et **1 000 m³/h** ou entre **2** et **5 %** du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau : déclaration au titre de la loi sur l'eau.

- La rubrique **1.3.1.0** concerne les prélèvements d'eau dans des zones spécifiques de déséquilibre hydrologique, appelées zones de répartition des eaux, où les seuils d'autorisation et de déclaration sont abaissés :
 - Capacité de prélèvement supérieure ou égale à **8 m³/h** : demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau ;
 - Dans les autres cas : déclaration au titre de la loi sur l'eau.

Cas particuliers :

Lorsque les installations, ouvrages, travaux et activités, qui sont soumis à déclaration au titre de la loi sur l'eau, sont situés à l'intérieur du **périmètre de protection** d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public et qu'ils comportent des opérations de sondage ou de travail souterrain, ils sont soumis à **l'autorisation** prévue à l'article L.1322-4 du code de la santé publique (article 2 du décret n°93-743 du 29 mars 1993 modifié).

Le code de l'environnement (installations classées)

Installations classées pour la protection de l'environnement : livre V, titre 1^{er}

Les pompes à chaleur sur nappe peuvent être soumises à déclaration ou autorisation au titre de la législation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en fonction de la puissance électrique du compresseur de la PAC : Rubrique 2920 de la nomenclature ICPE : Réfrigération ou compression (installations de) fonctionnant à des pressions effectives supérieures à **10⁵ pascals (Pa)** :

1. Comprimant ou utilisant des fluides inflammables ou toxiques, la puissance absorbée étant :

- a) Supérieure à 300 kW : autorisation
- b) Comprise entre 20 et 300 kW : déclaration

2. Dans tous les autres cas :

- a) Supérieure à 500 kW : autorisation
- b) Comprise entre 50 et 500 kW : déclaration

La nomenclature des ICPE ne comprend pas de rubrique spécifique liée aux forages

ou au prélèvement d'eau. Toutefois, ils peuvent être considérés comme des ouvrages connexes des activités soumises à autorisation ou déclaration au titre des ICPE lorsqu'ils sont nécessaires à leur fonctionnement. Ainsi, la déclaration ou l'autorisation d'exploiter les installations délivrée au titre de la législation des ICPE vaut autorisation ou déclaration au titre de la loi sur l'eau.

Le code de la santé publique

Il s'applique au cas particulier des forages destinés à un usage alimentaire. Si l'ouvrage destiné à un usage thermique dans une opération de pompe à chaleur est également utilisé, en second usage, pour un usage alimentaire (notamment eau destinée à la consommation humaine ou utilisée 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 (articles L1321-1 à L1321-10).

Les prélèvements à l'usage d'une famille sont soumis à déclaration à la mairie dans les conditions prévues à l'article L. 2224-9 du code général des collectivités territoriales.

Les autres prélèvements pour distribution par un réseau public ou privé sont soumis à autorisation.

PROCÉDURES INCITATIVES

Aquapac®

Cette procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques » a été mise en œuvre en partenariat entre l'ADEME, le BRGM et EDF. Elle est destinée à couvrir les risques d'aléas et de non pérennité de la ressource .

Aléas

Malgré toutes les précautions pouvant être prises (études préliminaires, conception) la pérennité de la ressource en eau de nappe ne peut être complètement assurée.

Si un forage d'essai n'a pu être réalisé, l'adhésion à cette procédure est une précaution indispensable.

Garantie de recherche

Elle couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu. Le forage de réinjection est inclus dans la garantie.

Pérennité

Même en cas de confirmation de la disponibilité de la ressource (après un essai de pompage sur site), l'adhésion à cette procédure reste pertinente pour faire face à des évolutions futures pouvant compromettre l'exploitation de l'aquifère :

- diminution de la ressource,
- dégradation de la qualité de l'eau.

Des informations complémentaires (brochure de présentation et dossier d'adhésion) sont téléchargeables sur le site internet :

<http://www.geothermie-perspectives.fr>

ou peuvent être obtenues auprès de la SAF-environnement (195, bd Saint-Germain - 75007 Paris - Tél. 01 58 50 76 76) qui assure le secrétariat du Comité Aquapac®.

Important : en cas d'échec, à savoir ressource insuffisante ou inexistante, il est possible, si l'environnement le permet, d'utiliser des sondes géothermiques qui permettent de prélever dans le sous-sol environ 50 W par mètre linéaire (voir annexe 3 , p. 68).

Mécanismes financiers

Il existe des mécanismes financiers nationaux (certificats d'économie d'énergie, crédit d'impôt pour les particuliers) et des aides régionales.

L'ADEME (www.ademe.fr) ainsi que les collectivités territoriales (région notamment) sont susceptibles d'aider les études de faisabilité, et dans certaines conditions l'investissement. Pour en savoir plus, consulter par exemple : le Conseil Régional d'Ile-de-France (www.iledefrance.fr), la délégation régionale de l'ADEME (<http://ile-de-france.ademe.fr/>) ainsi que le site dédié à la géothermie (www.geothermie-perspectives.fr).

Le champ des dispositifs fiscaux est assez large et concerne tant les particuliers que les entreprises et les collectivités. Il couvre la fiscalité de l'équipement domestique ou industriel.

Les dépenses fiscales directement destinées à favoriser les économies d'énergie concernent tant les particuliers, au travers du crédit d'impôt, que les entreprises, par l'intermédiaire de l'amortissement exceptionnel.

Le crédit d'impôt

Pour les particuliers, le crédit d'impôt porte sur les coûts des seuls équipements dont la finalité essentielle est la production de chaleur, quelle que soit la date d'achèvement de l'immeuble (pompes à chaleur, échangeurs, pompes de circulation...).

Le taux du crédit d'impôt pour les pompes à chaleur est fixé chaque année par la loi de finances. Pour être éligible, le coefficient de performance de la PAC est pris en compte. Cette procédure ne concerne que les particuliers.

Amortissement fiscal exceptionnel

Les entreprises du tertiaire ont droit à l'amortissement fiscal exceptionnel. Le dispositif de l'amortissement exceptionnel offre aux entreprises la possibilité de pratiquer un amortissement immédiat, sur douze mois à compter de leur mise en service, des matériels destinés à produire de l'énergie renouvelable (PAC, matériels divers, matériels de télégestion...).

Les certificats d'économie d'énergie

Les certificats d'économies d'énergie ont été créés par la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique (chapitres 1 et 2 du titre II) modifiée par l'article 51 de la loi n°2006-1537 du 7 décembre 2006 relative au secteur de l'énergie. Le dispositif des certificats est fondé notamment sur des opérations standardisées d'économies d'énergies téléchargeables sur le site : www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm

Les autres mécanismes financiers

Le **FOGIME**, Fonds de Garantie des Investissements de Maîtrise de l'Énergie, est destiné à encourager les investissements que réalisent les petites et moyennes entreprises en faveur de la maîtrise de l'énergie, en garantissant les prêts qu'elles contractent auprès des banques.

Aspects économiques et environnementaux

Aspects économiques : investissements	54
Études et maîtrise d'œuvre	54
Forages et équipements (travaux, maintenance)	54
Équipements de surface (pompe à chaleur, distribution, émetteurs, maintenance, redevance)	55
Analyse comparative avec les solutions traditionnelles	56
Aspects environnementaux	57
Énergie du sous- sol : une énergie renouvelable	57
Émissions de CO ₂ et taux d'émission	57
Impact des fluides frigorigènes	57



Aspects économiques

Il est important de rappeler que chaque cas est un cas spécifique, tant au niveau hydrogéologique que de la nature des besoins. Les valeurs indiquées ci-après relèvent des moyennes calculées à partir d'opérations récentes de l'ordre de 10 000 m² en général en milieu urbain avec contraintes.

INVESTISSEMENTS

Études et maîtrise d'œuvre

Étude de faisabilité	2 000 à 3 000 € HT
Dossier de déclaration (ou autorisation) = Notice d'incidence	2 000 à 4 000 € HT
Maîtrise d'œuvre (suivant importance du projet et limites de la mission)	5 000 à 8 000 € HT
Tests hydrogéologiques (suivi, interprétation)	3 000 à 5 000 € HT
Soit un montant total de prestations intellectuelles de	12 000 à 20 000 € HT

Forages et équipements

Le coût parfois élevé des forages (au regard des débits donc des puissances attendues) peut s'expliquer par :

- Les contraintes générées par l'intervention en milieu urbain : encombrement des machines de forages, démarches pour intervention auprès des services de la voirie, difficultés d'accès.
- « Une faible concurrence » : malgré un potentiel recensé au niveau national d'environ 30 foreurs, pour un projet donné, peu d'entreprises sont susceptibles d'intervenir. Pour beaucoup de ces entreprises l'essentiel de l'activité concerne des forages pour captage d'eau potable ou l'irrigation, donc hors milieu urbain.

Forages

Il est très complexe de définir une grille générale de coûts du poste forages et équipements tant la multiplicité des critères est importante.

En complément des références présentées en annexe, quelques éléments de coûts peuvent être identifiés qu'il convient d'utiliser avec « précaution ».

Coûts du poste forages seuls (hors équipements, réseaux, électricité, etc.)

800 à 2 000 € HT / ml

Équipements

Sur ce poste également, les coûts varient suivant de nombreux critères :

- caractéristiques des pompes (débit, hauteur manométrique, etc.),
- les systèmes de régulation et capteurs mis en œuvre,
- le linéaire des réseaux entre les puits de forages et le local technique de production.

Coûts des équipements

Sur la base d'opérations récentes, et pour un débit compris entre 60 et 100 m³/h (soit une puissance calorifique entre 625 et 1 045 kW) le montant estimatif de ce poste est de :

25 000 à 70 000 € HT

Maintenance

Coût annuel d'un contrat de maintenance des puits et équipement :

2 visites annuelles + rédaction d'un rapport

1 500 à 3 000 € HT

Opérations « exceptionnelles » (fréquence entre 10 et 15 ans)

Examen endoscopique par vidéo :

2 500 € HT

Dépose des pompes et colonnes pour examen et éventuel détartrage :

8 000 € HT

À noter que ce coût sera très variable suivant les conditions d'accès (extérieur ou en local technique, horaires et autres contraintes liées au site).

ÉQUIPEMENTS DE SURFACE

Investissements

Pompes à chaleur :

Le montant de ce poste est bien évidemment très variable suivant la puissance globale, le nombre et le type de machine.

En première approche, on peut estimer ce poste dans la "fourchette de coût" suivante :

250 à 350 € HT / kW chaud (pose et mise en service avec les raccordements)
(Machine seule : environ 150 € / kW chaud).

Distribution et émission :

Le surcoût induit sur les postes émetteurs (augmentation des surfaces d'échanges : batteries, radiateurs) et distributions (augmentation des diamètres des réseaux) peut être estimé à environ 15 % du poste. On privilégie des matériels certifiés Eurovent (<http://www.eurovent-certification.com>).

Maintenance

Coûts estimatifs de la maintenance du poste pompe à chaleur : le coût de maintenance des autres équipements est sensiblement identique quelle que soit la solution (PAC sur nappe ou chaufferie + groupe froid...).

Gamme de puissance frigorifique (kW)	Coût du contrat de maintenance du type P2
100 - 200	4 500 € HT /an
200 - 400	5 500 € HT /an
400 - 600	7 000 € HT /an
600 - 800	10 000 € HT /an
800 - 1000	15 000 € HT /an

Redevances

L'assiette de la redevance correspond à la quantité d'eau réellement puisée dans le milieu naturel (prélèvement) à laquelle s'ajoute la quantité d'eau non restituée (consommation).

Cette redevance est fonction du type d'activité du consommateur et du débit d'eau prélevé.

L'article 84 de la loi sur l'eau du 30 décembre 2006 concernant les redevances exonère la géothermie des taxes. Au 1^{er} septembre 2007, les décrets d'application n'étaient pas encore publiés.

Selon l'Agence de l'eau Seine-Normandie, si l'eau est réinjectée, cette exonération est totale sous réserve de justifier de la mise en œuvre de certaines « précautions techniques » (contrôle de la température de rejet et éventuellement by-pass de la réinjection et rejet dans le réseau d'assainissement en cas de dépassement des seuils autorisés (30 °C et écart prélèvement / rejet < 11 °C).

ANALYSE COMPARATIVE AVEC LES SOLUTIONS TRADITIONNELLES

L'analyse ci-dessous reprend le cas étudié au chapitre bilan énergétique (page 31).

Les valeurs données tant en coût de maintenance (**P2, P3**) qu'en investissements (forages notamment) résultent de moyennes sur quelques exemples. À ces valeurs est attachée une grande variabilité qui n'est pas toujours le fait de différences de configurations.

Coût d'exploitation	Pelec	Prime elec	Prime gaz	Coût ann. (P1)	€/m ²	P2	P3	Total €	€/m ²
	kW	€/an	€/an	€/an		€/an	€/an	€	
PAC eau-eau	110	4 356		22 760	2,28	8 000	7 000	37 760	3,78
PAC air-eau	150	5 940		30 034	3,00	8 000	4 000	42 034	4,20
Groupe froid + chaud gaz	150	5 940	756	53 538	5,35	12 500	7 000	73 038	7,30

Valeur Octobre 2007

Investissements en € HT (1)	Production €	Installation - Systèmes d'émission (2)	Forages €	Total €	€/m ²	Coût global actualisé (3) k€
PAC eau-eau	86 896	276 695	40 000	403 591	40,36	799
PAC air-eau	91 469	276 695		368 164	36,82	809
Groupe froid + chaud gaz	144 064	276 695		420 759	42,08	1 186

(1) hors génie civil.

(2) systèmes d'émissions identiques par plancher.

(3) CGA taux d'actualisation 8 % ; durée 15 ans ; inflation 3 % ; sans dérive du coût énergie.

Par rapport à la solution de référence groupe froid + chaudière gaz, l'économie est de l'ordre de 50 % en exploitation pour la solution eau - eau.

Important : chaque cas étant un cas particulier, seule une analyse détaillée par un bureau d'études spécialiste permettra d'évaluer de manière fiable l'intérêt économique de la solution PAC sur aquifère.

Aspects environnementaux

La géothermie (envisagée ici sous la forme de l'exploitation d'un aquifère) constitue une énergie renouvelable, la valorisation de l'énergie du sous-sol pouvant se faire de manière directe ou indirecte (pompe à chaleur).

Elle permet de limiter les dégagements de CO₂ ainsi que sa contribution aux phénomènes des pluies acides (émissions de SO₂ et NO_x) du fait de l'absence (ou tout au moins de la limitation) du recours aux énergies fossiles.

L'ÉNERGIE DU SOUS-SOL : UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE

Le sol se recharge thermiquement de manière continue par la circulation d'eau de nappe, les apports solaires (pour la partie supérieure) et l'exploitation (en mode alterné chaud / froid) de la nappe comme moyen de stockage thermique, permet d'utiliser la chaleur puisée en mode chauffage (abaissement de la température de nappe) laquelle est compensée en tout ou partie par la chaleur rejetée en mode rafraîchissement (élévation de la température de nappe).

ÉMISSIONS DE CO₂

La réduction des émissions de gaz à effet de serre constitue aujourd'hui une préoccupation principale au niveau mondial. La France, co-signataire du protocole de Kyoto entré en vigueur en janvier 2005, s'est engagée à stabiliser les émissions en 2010 au niveau de celles de 1990.

Une note de cadrage diffusée par l'ADEME et EDF le 14 janvier 2005 permet de spécifier par usage le dégagement de CO₂ pour un kilowattheure électrique.

Sur le critère d'émission de gaz à effet de serre, les solutions utilisant l'énergie électrique sont plus favorables que celles utilisant des énergies fossiles (pétrole, gaz...).

TAUX D'ÉMISSION

Les chiffres retenus pour définir les émissions de CO₂ évitées par la mise en œuvre d'une solution pompe à chaleur sur nappe sont les suivants :

Gaz	= 205 g CO ₂ / kWh d'énergie finale (PCS) ⁽⁴⁾
Electricité (5)	
Chauffage	= 180 g CO ₂ / kWh d'énergie finale.
Eclairage	= 100 g CO ₂ / kWh d'énergie finale.
Climatisation	= 40 g CO ₂ / kWh d'énergie finale.
Autres usages tertiaires	= 60 g CO ₂ / kWh d'énergie finale.

(4) Guide de l'ADEME « Qualité Environnementale des Bâtiments – Manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage », p 201. Ces chiffres sont par ailleurs repris dans le projet de référentiel technique de certification HQE du CSTB.

(5) Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France du 14 janvier 2005.

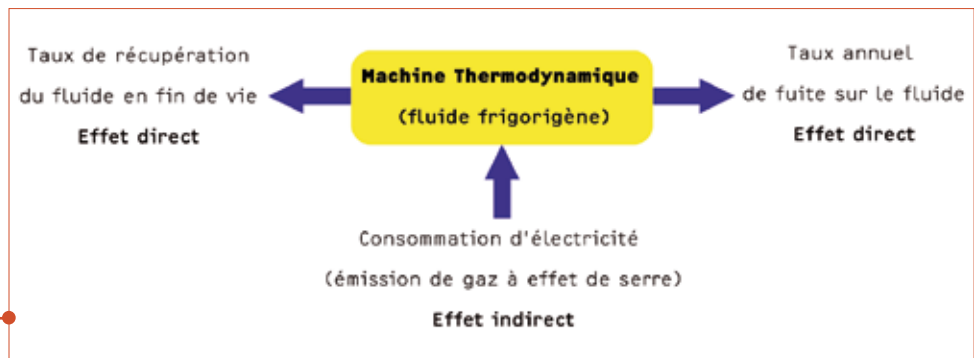
IMPACT DES FLUIDES FRIGORIGÈNES

Les fluides frigorigènes sont des composés chimiques pouvant générer un effet de serre très supérieur au gaz carbonique, s'ils sont libérés accidentellement dans l'atmosphère. Ce risque concerne aussi les groupes frigorifiques utilisés dans les installations classiques. En fonctionnement normal, il est très limité, du fait de l'utilisation en circuit fermé.

Les valeurs de réchauffement global ou GWP pour les principaux fluides frigorigènes ont été données au § 2.2

	R410a	R407c	R134a
GWP en kg eq. CO₂	1 730	1 530	1 300

La méthode de calcul consiste à estimer la quantité de fluides frigorigènes susceptible d'être rejetée dans l'atmosphère.



Exemple de calcul

L'installation de la solution PAC sur nappe comprend 2 machines utilisant le fluide frigorigène R 134A et d'une charge en fluide par machine de 67 kg. Le taux d'émission applicable pour ce fluide est de 1,3 tonne équivalent CO₂/kg de fluides.

Le taux de fuite pris en compte forfaitairement est de 3 %/an (compensé par la recharge lors des opérations de maintenance).

La quantité de fluide récupérée après une période de 20 ans est de 80 %, soit :

$$[3 \% + (1 - 80 \%) / 20] = 4 \%$$

Le rejet annuel d'une machine est donc de :

$$67 \text{ kg} \times 1,3 \text{ Téqu CO}_2/\text{kg} \times 4 \% = 3,48 \text{ Téqu Co}_2 \text{ arrondi à } 3,5 \text{ Téqu Co}_2$$

À partir des consommations électriques prévisionnelles, la contribution des fluides frigorigènes à l'effet de serre peut être convertie en taux de dégagement de CO₂ exprimé en g CO₂/kWh de consommations du système de production.

(1) $406\,444 \times 205 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$
 $+ 57\,776 \times 40 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$

(2) $92\,791 \times 180 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$
 $+ 57\,776 \times 40 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$

	Solutions	
	Chaufferie gaz + groupe froid	PAC sur nappe
Charge en fluide / machine	67 kg	67 kg
Nombre de machines	1	2
Charge totale en fluide	67 kg	134 kg
Rejet annuel CO ₂ lié au fluide	3,5 Téqu CO ₂	7 Téqu CO ₂
Consommations électriques de compresseurs	57 776 kWh	150 567 MWh
Consommations gaz	406 444 kWh PCS	x
Rejet annuel CO ₂ lié aux consommations d'énergie	85,6 Téqu CO ₂ (1)	19 Téqu CO ₂ (2)
Rejet annuel CO ₂ total	89 Téqu CO ₂	26 Téqu CO ₂

La solution pompe à chaleur sur nappe permet d'éviter le rejet d'environ 63 tonnes de CO₂ par an, soit un gain de 70 % par rapport à la solution chaufferie gaz + groupe froid.

La solution pompe à chaleur sur nappe permet d'éviter le rejet d'environ 53 kg de NOx par an, soit un gain de 67 % par rapport à la solution chaufferie gaz + groupe froid.

Domaines d'applications appropriés

Principes généraux.....	60
Centres commerciaux / Hypermarchés.....	60
Cliniques/hôpitaux.....	61
Immeubles de bureaux.....	62
Logements.....	63
Lotissements sur boucle d'eau.....	63
Couplage habitations commerces.....	64
Patinoires.....	64
Autres utilisations.....	64
Stockage intersaisonnier.....	64
Héligéothermie.....	64
Stockage à partir de serres horticoles.....	64



Domaines d'applications appropriés

PRINCIPES GÉNÉRAUX

La mise en place d'une PAC sur un bâtiment sera d'autant plus performante que les conditions évoquées dans les chapitres précédents seront satisfaites, en particulier la présence d'émetteurs basse température pour le chauffage.

Zone climatique	H1	H2	H3
Combustibles fossiles kWh primaire /m ² /an	130	110	80
Chauffage électrique (y compris PAC) kWh primaire /m ² /an	250	190	130

Pour **les bâtiments neufs**, il est nécessaire dès le départ de les concevoir avec des systèmes basse température.

La RT 2005 prévoit une consommation maximale en énergie primaire pour les consommations de chauffage, rafraîchissement et production d'eau chaude sanitaire selon les zones climatiques (voir tableau).

Pour **les bâtiments anciens**, cela dépendra du système de chauffage existant qu'il faudra éventuellement adapter. Un label français vient d'être lancé par l'association Effinergie (<http://www.effinergie.org>) pour promouvoir les constructions et les réhabilitations à basse énergie. Ce label est inspiré de labels européens, notamment le suisse Minergie et l'allemand Passivhaus qui ont une expérience d'une dizaine d'années. Le label français est tout à fait compatible avec l'utilisation de pompes à chaleur performantes.

Un certain nombre d'applications sont considérées comme plus favorables à l'utilisation de pompes à chaleur, on peut les classer en trois catégories :

- Les applications pour lesquelles les besoins de chaud et de froid sont concomitants pendant une bonne période de l'année: hypermarchés, hôpitaux, cliniques, certains immeubles du secteur tertiaire, les groupes sportifs piscines + patinoires, etc. Pour ces applications qui sont en général les mieux adaptées à la géothermie, on utilisera le principe de la thermofrigopompe.
- D'autres applications privilégient la réversibilité des pompes à chaleur, à savoir la fourniture de chaud en hiver et le rafraîchissement en été. C'est le cas d'immeubles du tertiaire (hôtels, maisons de retraite, etc.), de bureaux, mais aussi de certains logements qui par leurs configurations exigent un rafraîchissement en été.
- Enfin, la pompe à chaleur n'assure qu'une seule fonction : soit la fourniture de chaud, soit la fourniture de froid ; dans ce dernier cas on parlera de groupe frigorifique.

Certaines de ces applications sont analysées ci-dessous.

Centres commerciaux / hypermarchés

Dans un **hypermarché**, la surface se répartit selon les activités suivantes :

- Les boutiques qui présentent des besoins de froid importants du fait de l'importance des apports internes (notamment de l'éclairage).
- Le mail qui constitue principalement un lieu de passage.
- La surface de vente non alimentaire de l'hypermarché caractérisée par des besoins de chaud importants en hiver du fait du renouvellement d'air et des besoins de froid importants en été du fait de l'occupation et des apports internes.
- La surface de vente alimentaire qui présente principalement des besoins de chaud pour combattre en partie les dégagements frigorifiques des meubles réfrigérés.
- Les réserves qui présentent essentiellement des besoins de chaud du fait de la faiblesse des apports internes.

En complément des besoins énergétiques liés au traitement d'ambiance, les process liés à la production de froid alimentaire constituent un poste très énergivore.

Les particularités spécifiques des hypermarchés sont les suivantes :

- Une **demande de froid permanente** du fait de la présence de surface de vente alimentaire ;
- Des **apports internes conséquents** en raison des puissances d'éclairage élevées mises en œuvre et des forts taux d'occupation liés à ce secteur d'activité (puissance froide nécessaire estimée environ à 150 W/m²) ;
- Des **possibilités de transfert de chaleur** entre le froid alimentaire et le traitement d'ambiance de la surface de vente ;
- Les émetteurs utilisés pour assurer le traitement d'ambiance des locaux sont des **systèmes tout air** (CTA, roof-tops...) en raison de la forte occupation et du renouvellement d'air induit.

Par contre, compte tenu des apports internes dans les bâtiments de cette filière, la puissance froide nécessaire est importante et elle s'avère généralement « dimensionnante » pour les ouvrages de captage et de réinjection. Pour un hypermarché, l'utilisation de la nappe passe par la mise en place d'une thermofrigopompe permettant de faire du chaud et du froid tout au long de l'année.

Pour un **centre commercial**, l'utilisation de la nappe peut être différente. En effet, dans un centre commercial, une boucle d'eau dont la température fluctue entre 24 et 32 °C permet à chaque preneur de raccorder les appareils de traitement (appareil du type « PAC sur boucle d'eau »). Le refroidissement de cette boucle peut être réalisé directement par un échangeur à plaques alimenté par l'eau de la nappe.

Le froid alimentaire nécessite un refroidissement permanent afin d'évacuer les calories produites. Restreindre l'utilisation de la nappe pour ce seul usage ne permet pas l'équilibre thermique puisque l'on se contente de réinjecter de l'eau plus chaude que celle que l'on a puisée. Cette énergie calorifique doit être utilisée pour le traitement d'ambiance et éventuellement des besoins d'ECS et ainsi n'évacuer sur la nappe que l'énergie excédentaire.

Consommation énergétique moyenne	
Hypermarchés	300 à 700 kWh / m ² tous usages
Supermarchés	550 à 1 000 kWh / m ² tous usages
Grandes surfaces non alimentaires	200 kWh / m ² tous usages

Cliniques/hôpitaux

Ces bâtiments sont bien adaptés à l'utilisation des PAC sur nappe. Les besoins thermiques des **hôpitaux** et des **cliniques**, se déclinent généralement de la manière suivante :

- Le plateau technique nécessite de l'eau glacée tout au long de l'année.
- Du fait de la production d'eau chaude sanitaire, il est également nécessaire de disposer d'eau chaude en permanence.
- Les possibilités de transferts énergétiques sont, par conséquent, importantes.
- La production d'énergie doit pouvoir répondre à des contraintes importantes de secours qui conduisent souvent à un dédoublement des puissances installées.

Les maisons médicalisées, maisons de repos et maisons de retraites partagent cette particularité. La nature des émetteurs dépend des locaux à traiter avec une distinction forte entre le plateau technique (fort taux de renouvellement d'air et contrôle d'hygrométrie) et la zone d'hébergement (essentiellement des besoins de chauffage, les rafraîchissements étant occasionnels).

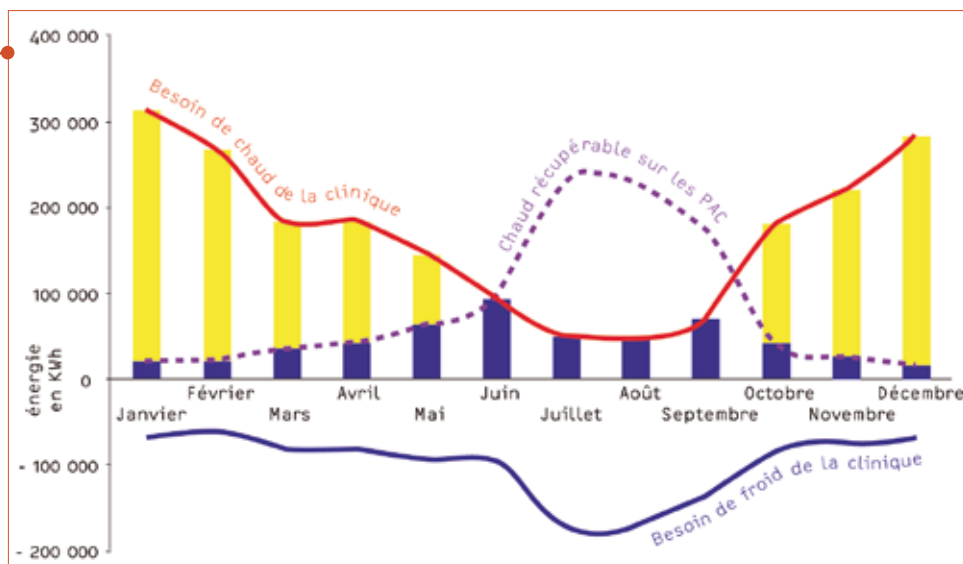
Pour les **bâtiments de grande taille** (en particulier les hôpitaux) :

- La puissance calorifique nécessaire est importante, ce qui se traduit par un débit puisé important. Pour illustrer cela, **1 MW chaud représente environ 100 m³/h**.
- La disponibilité de la totalité du débit requis pour assurer la totalité de la puissance calorifique n'est pas assurée.
- Des investissements importants sont à réaliser pour assurer la totalité du débit.
- Une demande d'autorisation est nécessaire en raison du dépassement du seuil de déclaration ; ce dernier point est annexe car ce type d'établissement est souvent soumis à autorisation pour d'autres motifs.

Exemple : Polyclinique

Ce graphique permet d'illustrer :

- la présence tout au long de l'année de besoins de chaud et de froid ;
- les possibilités de transfert d'énergie d'un réseau hydraulique vers l'autre (histogrammes bleus).



Les puissances nécessaires au bâtiment permettent de définir le débit idéal. Néanmoins, si ce débit n'est pas disponible sur le site, l'utilisation de la nappe reste une solution intéressante du fait :

- de la nécessité d'un secours ;
- du surdimensionnement des installations lié au calcul de déperditions fait aux conditions de base sans tenir compte des apports.

Ce dernier point fait que, même si la puissance disponible sur la PAC est nettement insuffisante pour satisfaire la totalité des déperditions, son fonctionnement peut permettre de couvrir la plus grande partie des besoins (si le système a été dimensionné sur un régime d'eau basse température).

Immeubles de bureaux

Ce secteur d'activité regroupe des bâtiments très différents allant de la tour au petit bâtiment de bureaux situé dans un village. L'objet de ce chapitre n'est pas de traiter des spécificités de ces deux extrêmes mais plutôt de traiter d'un bâtiment moyen (surface comprise entre 2 000 m² et 10 000 m²).

Les puissances nécessaires pour ce type de bâtiment sont en moyenne de :

- **Chauffage : 45 à 60 W / m²**
- **Rafrâichissement : 40 à 90 W / m²**

Ces valeurs dépendent essentiellement de la nature des parois, de l'importance et de la nature des surfaces vitrées, de la compacité du bâtiment, des apports internes (éclairage et informatique).

Les réglementations thermiques (RT2000 et RT 2005) ont eu pour conséquence pour les immeubles neufs ou rénovés :

- une amélioration du bâti qui induit une diminution des déperditions statiques ;
- une amélioration du système qui se traduit par une ventilation plus performante du point de vue énergétique et donc une diminution de la puissance chaude nécessaire.

D'autre part, les apports internes liés à ce type d'activité sont importants : bureautique, éclairage artificiel... Par conséquent, la puissance chaude et les besoins de chauffage sont faibles. Par contre, la puissance froide nécessaire est importante et elle est « dimensionnante » pour les ouvrages de captage et de réinjection.

Une solution de type « **thermofrigopompe** » est favorable du fait de l'obligation de pouvoir produire du chaud et du froid durant l'année.

L'utilisation d'un régime d'eau basse température dans ce cas de figure n'est pas préjudiciable sur l'investissement compte tenu d'une puissance chaude nécessaire faible.

En fonction de la simultanéité des besoins, une distribution 4 tubes, 2 tubes ou 2 tubes-2 fils par façade ou zone d'activité est nécessaire. Ce type de production permet de valoriser les transferts énergétiques des zones en demande de chaud vers les zones

en demande de froid et vice-versa. De même, la présence d'une salle informatique dans le bâtiment a un impact positif sur le bilan économique de cette solution.

L'utilisation de l'eau de nappe comme source de rafraîchissement directe sera privilégiée, mais généralement insuffisante dans la majeure partie des cas et nécessitera un appoint pour assurer le confort.

Néanmoins, la démarche HQE dans laquelle s'inscrivent de plus en plus de projets peut aboutir à une conception de bâtiment (isolation, protections solaires) et à une conduite des équipements (ventilation naturelle, surventilation nocturne, ...) permettant de limiter les besoins énergétiques du bâtiment. Dans ce cas, l'utilisation de planchers ou de plafonds rafraîchissants peut amener le complément d'énergie nécessaire à l'obtention du confort.

Le débit de puisage est déterminé par la puissance froide. Si un complément de puissance chaude est nécessaire, la mise en place d'une batterie électrique dans le ballon tampon (variante : batteries électriques sur les terminaux) apparaît une solution suffisante compte tenu des faibles besoins de chauffage de ce type de bâtiment.

Les seuils de débit pour la déclaration ou l'autorisation dans le chapitre sur la réglementation peuvent être convertis en surfaces limites :

- pour une surface comprise entre 1 000 m² et 10 000 m² : dossier de déclaration,
- pour une surface supérieure à 10 000 m² : demande d'autorisation.

Pour les bâtiments d'une surface supérieure à 20 000 m², la demande d'autorisation est nécessaire du fait d'une puissance électrique des compresseurs des groupes frigorifiques supérieure à 500 kW (voir rubrique 2920 de la réglementation des ICPE).

Logements

Le recours à la climatisation est pénalisée par la RT 2005 pour le logement, le coefficient de performance minimal de ces produits a été revu à la hausse pour favoriser en priorité la qualité de conception de l'enveloppe (bioclimatique) devant assurer un confort d'été à un coût énergétique moindre. Néanmoins la fixation d'un seuil maximum de consommation d'énergie, par rapport à une consommation de référence, est très favorable à la production de chauffage avec pompe à chaleur géothermique, ceci en comparaison aux autres modes de chauffage avec énergie fossiles.

Pour un bâtiment de taille moyenne (surface moyenne de 80 m²), les puissances nécessaires pour le chauffage sont fonction du coefficient G de déperdition volumique en W/m³/°C :

		Logement ancien		Logement récent	
		G = 2		G = 0,6	
		Paris	Nancy	Paris	Nancy
Puissance	kW	10,8	14	3,2	4,2
Conso	kWh	22000	30000	3950	6200
Conso/m²	kWh	275	375	49	78
Température de non chauffage	°C	17	17	13,1	13,1

Pour le Chauffage

Pour l'eau chaude sanitaire : La consommation d'eau chaude est généralement de 50l/jour/personne. En supposant que 3 personnes occupent le logement, la consommation annuelle sera de l'ordre de 3 600 kWh.

Lotissements sur boucle d'eau

Il s'agit d'une application originale – fondée sur la distribution d'eau géothermale à partir de laquelle les utilisateurs prélèveront l'énergie nécessaire avec leur pompe à chaleur – qui doit être prévue très en amont de la réalisation. Le réseau de distribution d'eau associé à la boucle d'eau doit pouvoir être mis en place en synergie avec les autres réseaux de façon à en limiter le coût d'investissement.

Pour un pavillon de 100 m² construit selon les dispositions de la RT 2005 un débit maxi de 0,5 m³/h est suffisant pour assurer la totalité des besoins. Le rafraîchissement s'il est souhaité par les occupants pourra se faire par échange direct.

Couplage habitations commerces

Dans le cadre de réaménagement urbain ou de création de zones où sont associés logements et surfaces commerciales, la globalisation de besoins de chaud pour les logements et de froid pour les commerces peut justifier l'utilisation d'une frigopompe sur nappe centralisée. En été, la chaleur issue de la production de froid nécessaire pour les commerces peut assurer l'énergie nécessaire à la fourniture d'ECS des habitations.

Patinoires

L'association piscine patinoire est l'exemple type d'une synergie applicable entre la fourniture de chaud et de froid, et où la PAC sur nappe constituera le moyen idéal pour la fourniture des fluides, des transferts et de la déshumidification nécessaire à la piscine. L'utilisation de pompes à chaleur géothermique pour des installations municipales, telles que les salles communautaires et les patinoires est un concept qui se développe outre-Atlantique dans le marché des installations municipales. Lorsque les pompes à chaleur géothermiques peuvent en plus être utilisées pour chauffer la piscine et des locaux avoisinants, le rendement financier d'une telle installation est encore plus intéressant.

Autres utilisations

De nombreux autres exemples de bâtiments exploitent l'énergie géothermique : musées, bibliothèques, grandes salles de concert, écoles, pour lesquels nous ne proposons pas de typologie, mais rien n'interdit de raccorder l'ensemble des types de bâtiment à la chaleur de la terre.

STOCKAGE INTERSAISONNIER

Héliogéothermie

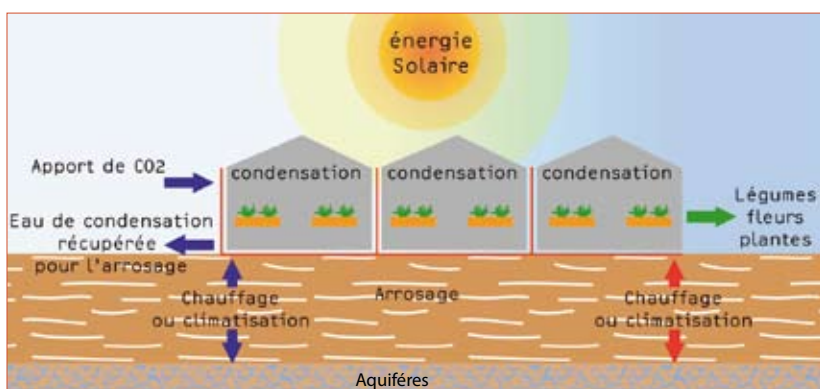
La réversibilité dans le cadre d'un fonctionnement alterné été-hiver permet de restituer au milieu prélevé une quantité d'énergie qui peut être équivalente à celle prélevée.

Le « dopage » thermique de l'aquifère peut également être réalisé par l'énergie solaire. L'héliogéothermie consiste donc à fournir avec des capteurs solaires de l'eau chaude qui est injectée dans la nappe. Les capteurs solaires peuvent être placés sur les bâtiments à chauffer.

Des expériences de ce type ont été réalisées dans les années 80 (Aulnay-sous-Bois, Montreuil, Nîmes, Bègles...) puis arrêtées suite, soit à cause du contexte économique, soit pour des raisons techniques. Des enseignements précieux ont cependant été recueillis pour développer de nouvelles opérations.

En région Ile-de-France, le rayonnement solaire apporte 1 200 kWh/an/m² à comparer au 50 kWh/m² nécessaire pour le chauffage d'une habitation récente. Avec un rendement de captation solaire de 50 % et de stockage/déstockage de 50 % également, il serait possible **théoriquement** de chauffer un immeuble de 6 étages équipé de capteurs sur toute la surface du toit.

Stockage à partir de serres horticoles



La serre est la zone de transferts thermiques, où, via un échangeur, l'eau capte ou restitue la chaleur stockée dans l'aquifère.

Le stockage repose sur un principe simple. Deux forages sont creusés de chaque côté de la serre. Le premier fait office de puits froid et le second de puits chaud. En été, l'eau circule dans les tubes qui parcourent la serre et captent la chaleur. L'eau réchauffée est alors stockée dans le puits chaud. En hiver, l'eau suit le trajet inverse et réchauffe la serre.

Ce type de réalisation qui s'est développé par exemple aux Pays-Bas, est en cours d'expérimentation en France.

Projet d'expérimentation au CTIFL de Balandran (Gard)

Annexes

Déroulement d'une opération de géothermie PAC sur aquifère	66
Cahier des charges d'études de faisabilité d'une opération de géothermie PAC sur aquifère	67
Capteurs géothermiques verticaux	68
Pour en savoir plus	69



ANNEXE 1 : DÉROULEMENT D'UNE OPÉRATION DE GÉOTHERMIE POMPE À CHALEUR SUR AQUIFÈRE

Les résultats économiques d'une opération de géothermie dépendent de la qualité de sa conception et de sa réalisation, et surtout de l'adéquation entre la ressource géothermale et les besoins.

En effet, les coûts d'investissement étant généralement plus lourds que dans le cas d'une opération de chauffage classique, la rentabilité de l'opération sera plus sensible à la limitation de la puissance installée aux besoins réels, et dépendra des choix qui seront effectués dans l'utilisation effective de l'énergie géothermale : débits de pompage, écart entre température de production et d'injection, régulation thermique...). Il convient donc d'optimiser la mise en adéquation de la ressource géothermale et des besoins thermiques.

Les principales démarches successives pour la réalisation d'une opération de géothermie avec pompes à chaleur sur aquifère superficiel sont les suivantes :

Analyse du contexte général et définition des objectifs

- Caractéristiques hydrogéologiques du site (diagnostic fondé sur des inventaires régionaux, l'existence d'un SIG, des études sur des opérations voisines...).
- Contexte urbanistique, choix socio-économique, politique et environnemental.
- Évaluation des besoins en chaud et/ou en froid (estimation des puissances et des consommations).

Organisation de la conception de l'opération

- Choix d'un bureau d'études sous-sol.
- Choix d'un bureau d'études surface.

Étude de faisabilité

- Aquifère cible, description des forages (doublet – puits unique).
- Schéma et fonctionnement de la boucle thermique.
- Caractéristiques de la solution technique retenue.
- Définition du programme des travaux.

Démarches administratives

- Dossier de déclaration et/ou d'autorisation : déclaration code minier, loi sur l'eau, code environnement (puissance PAC), garantie Aquapac®.
- Organisation de l'opération
- Choix des ingénieries sous-sol, surface.

Réalisation des ouvrages

- Consultation des entreprises.
- Suivi des travaux.
- Interprétation des résultats.
- Actualisation des données prévisionnelles.
- Calage de l'opération.
- Réception des ouvrages.

Mise en service

Exploitation

Maintenance

ANNEXE 2 : CAHIER DES CHARGES D'ÉTUDES DE FAISABILITÉ D'UNE OPÉRATION DE GÉOTHERMIE POMPE À CHALEUR SUR AQUIFÈRE

Définition des principales caractéristiques de l'aquifère

- Analyse du contexte géologique (en tenant compte des forages à proximité et en utilisant la base de données des forages BSS (www.infoterre.fr)).
- Choix de l'aquifère.
- Coupe géologique prévisionnelle (profondeurs, épaisseurs, stratigraphie...).
- Caractéristiques hydrogéologiques du réservoir (perméabilité, porosité, transmissivité, pression hydrostatique, chimie...).
- Caractéristiques prévisionnelles d'exploitation : débit (avec pompage et en artésianisme).

Analyse des besoins thermiques

Il s'agit d'établir les caractéristiques des installations de production de chaleur :

- Leur localisation et leur identification sur un plan.
- La nature des bâtiments : logements, bureaux, commerces, locaux industriels...
- Les besoins et les systèmes d'émission de la chaleur, de froid et d'ECS.
- L'évaluation de la puissance thermique nécessaire par -7°C .
- La nature des émetteurs de chauffage (loi d'eau).
- Le mode de distribution régulation (chauffage et ECS).
- Existence ou non de l'appoint – secours.

Définition des installations sous-sol (boucle géothermale)

- Étude de l'implantation du(des) site(s) de forage en fonction des terrains disponibles, des contraintes de forage, des nuisances du chantier, des interférences hydrothermiques, de l'écoulement de la nappe.
- Coupe technique des puits (profondeurs, diamètres et matériaux des tubages).
- Programme des tests hydrogéologiques.
- Détermination des puissances de pompage (production et réinjection),
- Prise en compte de contraintes réglementaires spécifiques.

Analyse de l'adéquation entre les besoins et la ressource géothermique, bilans

- En fonction des hypothèses sur la ressource, il sera établi un bilan énergétique précisant notamment le nombre de MWh géothermiques susceptibles d'être distribués et les taux de couverture.
- Synthèse et choix des solutions à retenir.
- Pour chacune des variantes, le bilan des émissions de CO_2 et de NO_x par rapport à la solution de référence sera établi.

Coûts Investissements

Boucle géothermale

- Études, ingénierie, assurances, garantie.
- Travaux de génie civil de la plateforme de forage.
- Forages du ou des puits.
- Équipements de pompage et variateurs (production et injection).
- Échangeurs.
- Autres équipements.
- Chaufferie.

Installations de surface

- Études, ingénierie, assurances.
- Génie civil réseau.
- Canalisations (longueur, diamètres, coût par ml).
- Modification ou création des sous-stations.
- Création ou adaptation de chaufferies d'appoint-secours.
- Télégestion.

Coûts d'exploitation

- Électricité de pompage (production + réinjection), circulation surface.
- Appoint.
- Contrôles périodiques et suivi du réservoir.
- Gros entretien et renouvellement.

Couverture du risque géologique

Le captage des aquifères comporte des risques géologiques. Ils pourront être couverts par la garantie Aquapac®.

Financements de l'opération

Aides : ADEME, Région, Autres.

Il sera également pris en compte les ressources provenant des crédits carbone, des certificats d'économies d'énergies et du crédit d'impôt, dont pourraient éventuellement bénéficier certains utilisateurs.

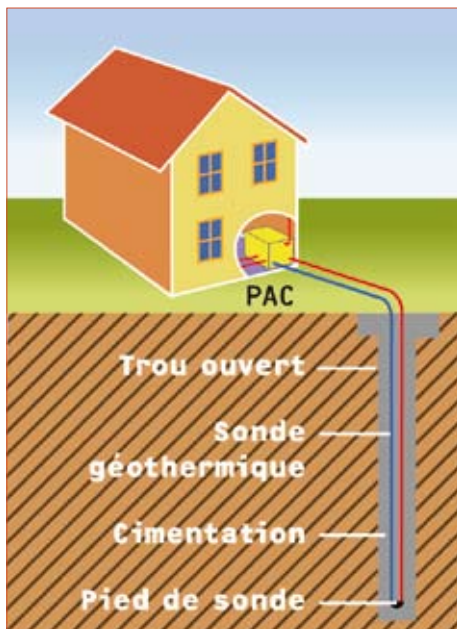
Analyse économique - Bilans

Il s'agit de comparer la solution existante, à base d'énergies fossiles, et une solution de conversion à la géothermie.

L'amortissement des investissements sera calculé sans subvention et avec subventions. On calculera ainsi les indicateurs financiers suivants :

- Prix de revient du MWh de chaleur produite.
- Temps de retour (brut, net).
- Taux de rentabilité interne.

ANNEXE 3 : CAPTEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX



Les pompes à chaleur sur capteurs géothermiques verticaux (sondes verticales ou géosondes) appelées également parfois « sondes sèches » exploitent par échange la chaleur souterraine du sous-sol à des profondeurs n'excédant pas en général 100 m, pour des raisons d'autorisation administrative. Elles ne nécessitent pas la mobilisation d'un aquifère et sont donc applicables en tout lieu.

L'échangeur enterré dans le sous-sol est constitué d'une ou de plusieurs sondes verticales composées de deux tubes en U en matériaux synthétiques placés dans le forage. Le contact entre le capteur et le sous-sol se fait par l'intermédiaire d'un mélange de ciment et de bentonite.

Ces capteurs enterrés verticaux sont parcourus par un liquide antigel, mis en mouvement par une pompe de circulation.

Le dimensionnement des capteurs s'effectue en mode chaud sur la base d'une puissance soutirée au sous-sol de l'ordre de 50 W/ml (puissance source froide de la pompe à chaleur).

La capacité de prélèvement dépend néanmoins de la nature des roches traversées et une étude spécifique est nécessaire pour déterminer la longueur à forer.

Nature du sous-sol	Conductivité thermique (W/mK)	Puissance d'extraction W/m	Longueur sonde m/kW de puissance COP : 3,5
Gravier, sable, sec	0,4	< 20	> 36
Gravier, sable, aquifère	2	60	11
Argile, limon, humide	1,7	35	19,5
Calcaire massif	2,8	52,5	13
Grès	2,3	60	11
Granite	3,4	62,5	12
Basalte	1,7	45	16,5
Gneiss	2,9	65	13

Pour assurer des puissances comparables à celles prélevées sur un aquifère, il est nécessaire de mettre en œuvre plusieurs sondes dont l'implantation doit respecter certaines règles de disposition.

À titre d'exemple, pour assurer la même puissance thermique de 1 MW :

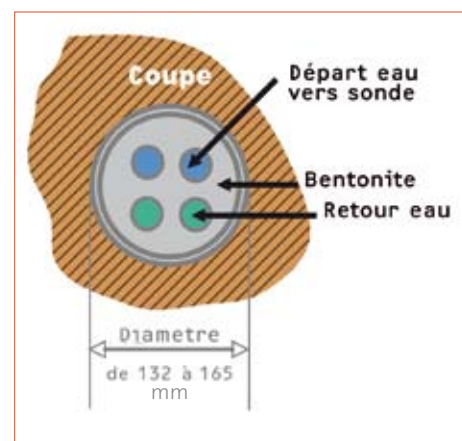
- une PAC sur aquifère nécessitera un débit de 90 m³/h,
- une PAC sur sondes nécessitera de l'ordre de 150 sondes de 100 m.

À noter que si les coûts d'investissements sont en général plus élevés pour un champ de sondes que pour un forage en aquifère, les coûts d'exploitation sont par contre nettement plus favorables à la solution « sondes sèches ».

La maîtrise de la qualité est l'une des conditions du succès, aussi bien pour assurer la performance thermique que pour garantir la pérennité et l'intégrité des installations du sous-sol.

La mise en place de la procédure qualité « Foreurs Qualité PAC » sous l'égide de l'ADEME, d'EDF et du BRGM, doit permettre l'engagement des entreprises de forages au respect des règles de l'art et des règles administratives.

Coupe horizontale des capteurs géothermiques enterrés.



POUR EN SAVOIR PLUS

Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM, avec une rubrique spécialement consacrée à l'Ile-de-France dans laquelle se trouve l'outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe en région Ile-de-France

www.geothermie-perspectives.fr

Association française pour les pompes à chaleur (AFPAC)

www.afpac.org

Syndicat national des entrepreneurs de puits et forages d'eau (SFE)

www.sfe-foragedeau.com

Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement d'Ile-de-France (DRIRE Ile-de-France)

www.iledefrance.drivre.gouv.fr/

AQUAPAC : SAF-environnement

195, bd Saint-Germain - 75007 Paris Tél. 01 58 50 76 76

CVC, la revue des climaticiens, éditée par l'Association des ingénieurs en climatique, ventilation et froid (AICVF)

www.aicvf.com

La pompe à chaleur - Jacques Bernier - Éditions Pyc

Les pompes à chaleur - Bruno Béranger - Éditions Eyrolles

Lexique

AQUIFÈRE

Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capables de la restituer naturellement et/ou par exploitation. On distingue :

- **Aquifère à nappe libre** : l'aquifère reposant sur une couche très peu perméable est surmontée d'une zone non saturée en eau.
- **Aquifère captif (ou à nappe captive)** : dans une nappe captive, l'eau souterraine est confinée entre deux formations très peu perméables. Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage.

ARTÉSIEN

Qualifie un forage exploitant une nappe captive dont la surface piézométrique se trouve au-dessus du sol et qui fournit donc de l'eau jaillissante. Ce mot vient de l'Artois, province du nord de la France, où dès le début du XIX^e siècle, des puits « artésiens » avaient été forés.

BOUE DE FORAGE

Fluide utilisé en forage rotary et injecté en continu par les tiges au cours du forage. La boue est constituée d'eau, d'argile (bentonite), de sable, d'air comprimé, de polymères et d'huile émulsionnée selon les cas.

CIMENTATION

La cimentation d'un tubage dans un forage consiste à remplir de ciment l'espace annulaire entre le tubage et la paroi naturelle du forage. Cette cimentation a pour but de sceller le tubage aux terrains traversés ce qui permet de protéger la qualité des eaux souterraines (afin d'éviter le mélange d'eaux de différents niveaux et l'infiltration d'eau de surface).

COLONNE DE PRODUCTION

(colonne d'exhaure)

Conduite verticale disposée dans un forage servant à pomper l'eau souterraine.

COMPLÉTION

Ensemble des opérations (forage, tubage, pose de la crépine, développement...) faites sur une couche aquifère, commençant au forage de cette couche et se terminant quand elle est mise en production

CRÉPINE

Partie perforée du tube cylindrique servant à aspirer ou réinjecter l'eau de la nappe tout en retenant les particules fines du terrain (sable...). Les types de crépines sont déterminés suivant la forme et le pourcentage de vides pour allier résistance mécanique et vitesse de l'eau dans les ouvertures ou « slots ».

CARACTÉRISTIQUES DE L'EAU

Le terme de qualité porte sur le caractère corrosif et/ou incrustant de l'eau de nappe qui est déterminé à partir des paramètres suivants :

- **Le titre hydrotimétrique ou dureté de l'eau** (exprimé en degré français ou °TH) lié à la concentration en ions calcium (Ca) et qui influe sur le caractère incrustant de l'eau exploitée.
- Les concentrations (en mg.L⁻¹) en ions calcium (Ca), sulfates (SO₄), magnésium (Mg) qui peuvent générer des dépôts sur les crépines et les parois des pompes, tuyauteries et échangeurs.
- La concentration (en mg.L⁻¹) de l'ion chlorure (Cl) qui influe sur le pouvoir corrosif de l'eau.

INCRUSTANT

Caractérisation du phénomène de formation sur les parois des tuyauteries ou équipements (échangeurs, pompes...) d'une couche de tartre constituée essentiellement de sels (carbonates, sulfates, silicates de calcium...) provenant des eaux dures ou calcaires.

CORROSIF

Aptitude d'une eau à dissoudre les métaux, liée à sa composition physicochimique (pH, résistivité, teneur en oxygène, chlorure...).

La corrosivité augmente avec la température.

CLIMATISATION

La climatisation se distingue notamment du rafraîchissement par une obligation de résultat. Elle assure la température été comme hiver, ainsi que la qualité d'air en termes de filtration, ainsi que l'humidité relative.

DIAGRAPHIE

Enregistrement dans un forage, en fonction de la profondeur, d'une grandeur physique déterminée.

DOUBLET

Ensemble de deux forages, l'un assigné à la production, l'autre à la réinjection dans l'aquifère d'origine.

EVI (Enhance Vapor Injection)

Injection de vapeur au cours du cycle de compression. Ce système permet de travailler avec des températures de départ maximales jusqu'à 65 °C, augmente les performances en plein hiver et, même en cas de conditions extrêmes, améliore le COP.

FREE COOLING

Rafrâichissement gratuit, dans le cas d'utilisation d'aquifères ; il s'agit d'utiliser la capacité de refroidissement du fluide sans utiliser la PAC.

MASSIF FILTRANT

Il s'agit d'un massif de gravier ou de sable mis en place entre la crépine et le terrain dans le but d'empêcher le passage des éléments les plus fins de l'aquifère capté.

NAPPE ALLUVIALE

Nappe contenue dans le terrain situé de part et d'autre d'une rivière et contenue dans les alluvions de celle-ci. Les eaux de ces nappes peuvent être en liaison hydraulique directe avec les eaux du cours d'eau associé (nappe d'accompagnement).

NAPPE D'EAU SOUTERRAINE

Ensemble de l'eau présente dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Les nappes sont en général alimentées par l'infiltration d'eau de pluie. Elles alimentent, à leur tour, les rivières et les étangs.

NAPPE PHRÉATIQUE

Nappe libre souterraine proche de la surface. C'est une nappe d'eau souterraine contenue dans un aquifère, limitée vers le bas, et éventuellement, latéralement.

PIÉZOMÈTRE

Forage dans lequel on descend un tube crépiné au niveau d'un aquifère et qui permet de mesurer la hauteur piézométrique dans cet aquifère.

POMPAGE D'ESSAI (essais de pompage, tests de pompage)

Pompage et ensemble des essais permettant :

- de vérifier la capacité de production du forage (débit),
- d'évaluer l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (rayon d'influence).

RABATTEMENT

Abaissement du niveau piézométrique d'un aquifère engendré par un pompage. La courbe caractéristique permet de définir le débit maximal d'exploitation.

RAFRAÎCHISSEMENT

En principe, en été, le rafraîchissement apporte un maintien ou un abaissement global de la température intérieure du bâtiment de quelques degrés vis-à-vis de l'extérieur. C'est seulement une amélioration du confort d'été.

RÉSERVOIR GÉOLOGIQUE

Formation géologique dans laquelle circule l'eau souterraine. La porosité et la perméabilité de la roche du réservoir caractérise l'aquifère.

SDAGE

Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Né de la loi sur l'eau de 1992, le SDAGE fixe pour chacun des six bassins hydrographiques français les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dans l'intérêt général et dans le respect des principes de la loi sur l'eau.

VENTILOS CONVECTEURS

Échangeur à air ventilé constitué de 2 ou 4 tuyaux, ou 2 tuyaux - 2 fils qui distribue selon les besoins du chaud ou du froid.

Points à retenir pour l'installation d'une PAC géothermique sur aquifère

Cette étude peut nécessiter la mise en place d'un forage test

- **limiter les besoins du bâtiment en chauffage et rafraîchissement** (démarche HQE, conception bioclimatique).
- Si les données issues de cette première étape permettent d'envisager une solution de pompe à chaleur géothermique sur aquifère, il faut alors réaliser **une étude hydrogéologique** comportant une description succincte du projet : le lieu, le débit recherché (au préalable il faut avoir une estimation des besoins thermiques en puissance et en kWh).
- **Réaliser l'étude approfondie de la nappe :**
 - La température ;
 - Le sens d'écoulement de la nappe ;
 - La transmissivité ;
 - La réglementation en vigueur applicable à ce projet ;
 - Le nombre de forages de pompage et de réinjection pour le débit souhaité, en veillant à leur implantation sur le site et si nécessaire à la diffusion du panache thermique (notamment pour les sites avec une faible surface au sol) ;
 - Le rabattement prévisionnel ;
 - Une coupe du forage (diamètre, pompe, type de tubage, crépine, etc.).
- **Souscrire la garantie Aquapac.**
- **Faire réaliser le forage par un professionnel.**
- **Installer une pompe de forage à vitesse variable.**
- **Installer une filtration sur le forage.**
- **Installer un ou des échangeurs** (à plaques, bien souvent en Inox 316L) entre l'eau du forage et l'eau des réseaux de chauffage et de rafraîchissement.
- **Choisir une PAC comportant plusieurs circuits et certifiée Eurovent.**
- **Équiper les réseaux secondaires de pompes à vitesse variable.**
- **Poser des compteurs de calories, frigories** et des compteurs d'énergie électrique consommée par la PAC afin de mesurer le COP.
- **Bien piloter l'installation** , en n'oubliant pas pour les locaux à usages intermittents (type bureaux) les ralentis de nuit et de week-end.
- **Effectuer la maintenance** des installations y compris celle du forage.

ARENE

94 bis, avenue de Suffren
75015 Paris
Tél. 01 53 85 61 75
www.areneidf.org

BRGM

Département Géothermie
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2
Tél. 02 38 64 34 34
www.brgm.fr

EDF

R&D - Département EnerBat
Groupe E11
Assistance Technique Tertiaire
BP 46
77818 Moret-sur-Loing
Tél. 01 60 73 78 64
www.edf.fr

ADEME

Délégation régionale Ile-de-France
6-8, rue Jean-Jaurès
92807 Puteaux Cedex
Tél. 01 49 01 45 47
<http://ile-de-france.ademe.fr>

www.geothermie-perspectives.fr

