

TECHNOLOGIE UTILISEE OU GENERIQUE	POMPE A CHALEUR EN GENERAL ET PLUS PARTICULIEREMENT AQUIFERE
<p>Type d'usage</p> <p>Collectif</p> <p>Individuel</p>	<p>Les pompes à chaleur (PAC) utilisant comme source froide les nappes d'eau souterraine, sont utilisées pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Ce type de géothermie utilise la très basse énergie.</p> <p>On distingue trois autres types de géothermie : la haute, la moyenne, et la basse énergie. Les sites géothermiques à haute et moyenne énergie permettent la production d'électricité. Tandis que la production de chaleur est obtenue à partir des sites géothermiques de basse énergie (utilisation des nappes d'eau chaude du sous-sol profond), comme la très basse énergie (utilisation de pompe à chaleur).</p> <p>En général le coût du captage limite l'utilisation de PAC aquifère à des groupes de maisons, bâtiments publics ou immeubles de logements pour les solutions individuelles. Dans certaines régions, la configuration de la nappe (présence d'eau très peu profonde par rapport au niveau du sol), peut rendre rentable le système PAC aquifère pour le particulier.</p> <p>Dans tous les cas que ce soit en usage individuel ou collectif, il faut que la géologie du site présente une nappe d'eau souterraine pour permettre l'utilisation de PAC aquifère.</p>

Schéma de principe : Figure 1. Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur à compression (Source Viessmann). Ce type de pompes à chaleur est considéré comme étant une solution moderne et reste le plus répandu. Il existe différentes pompes à chaleur pouvant être classées selon leur type ou leur principe de fonctionnement en :

- Pompes à chaleur à compression.
- Pompes à chaleur à sorption (subdivisées en pompes à chaleur à absorption et pompes à chaleur à adsorption).
- Pompes à chaleur Vuilleumier (pas encore de produit dans le commerce).

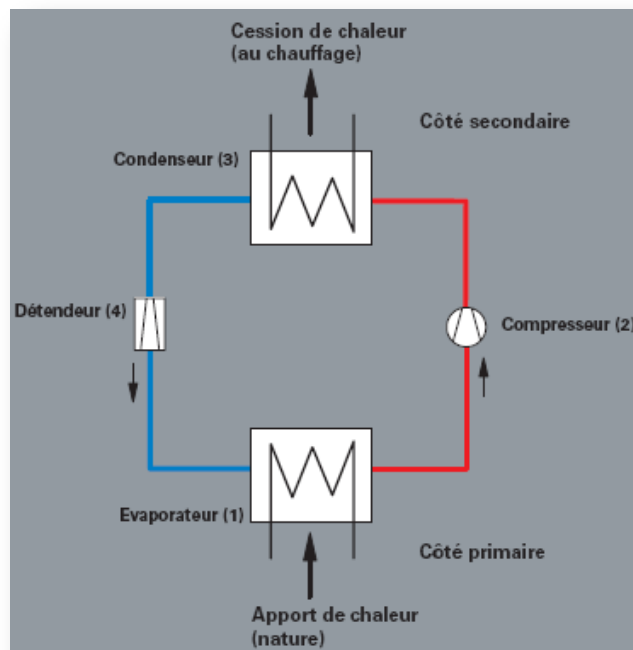


Figure 1. Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur à compression

Schémas applicatifs (innovations sous-jacentes) :

Le schéma de la figure 2 ci-après donne un montage assez courant d'une PAC sur aquifère permettant en particulier la réversibilité du système (rafraîchissement ou climatisation, chaud et froid, free-cooling (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, rafraîchissement gratuit)).

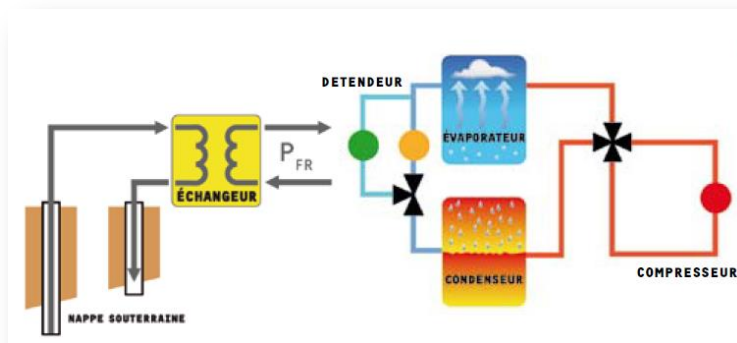


Figure 2. Schéma de principe général d'une PAC sur nappe (Source ADEME – Guide technique PAC sur aquifère)

Description synthétique :

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), (Source ADEME – Guide technique PAC sur aquifère).

Il existe différents types de pompes à chaleur selon la nature de la source froide de laquelle elle puise l'énergie avant de la restituer au fluide de chauffage :

- les pompes aérothermiques qui captent l'énergie de l'air extérieur ou extrait ;
- les pompes à chaleur sur l'eau (ou « aquifère ») qui utilisent l'eau des rivières, nappes phréatiques... ;
- les pompes géothermiques (ou « géothermales ») qui captent l'énergie du sol.

Il existe plusieurs procédés de pompes à chaleur, la principale différence tient à la nature des fluides circulant dans les capteurs et les émetteurs de chauffage (source ADEME) :

- PAC à détente directe, un seul circuit : le fluide frigorigène circule en circuit fermé dans la pompe, les capteurs et les émetteurs de chaleur. Ce type de PAC contient beaucoup de fluide frigorigène ;
- PAC mixtes (ou fluide frigorigène/eau), deux circuits : celui du fluide frigorigène des capteurs et de la pompe à chaleur et celui de l'eau chaude des émetteurs ;
- PAC à fluides intermédiaires (eau glycolée/eau ou eau/eau), trois circuits : le circuit frigorifique de la pompe à chaleur, le circuit des capteurs où circule de l'eau additionnée d'antigel dans le cas de capteurs géothermique ou de l'eau en cas de puisage dans la nappe, le circuit qui alimente en eau chaude les émetteurs ;

Les PAC géothermiques peuvent être à détente directe, à fluides intermédiaires ou mixtes. Pour les PAC sur aquifère, elles sont essentiellement à fluides intermédiaires. Les caractéristiques de ces pompes à chaleur sont résumées dans le tableau suivant :

PAC géothermiques		
Capteurs enterrés horizontaux	Capteurs enterrés verticaux	PAC sur eau de nappe
PAC à détente directe		
PAC mixte		
PAC à fluides intermédiaires		
		PAC à fluides intermédiaires

Tableau 1 : Caractéristiques des pompes à chaleur (source ADEME)

Schéma d'intégration :

Les systèmes de pompes à chaleur d'aquifère qui utilisent un apport constant d'eau souterraine comme fluide caloporteur sont des systèmes à boucle ouverte. (Figure 3). Son échangeur est constitué de puits où l'eau souterraine de l'aquifère est directement pompée vers l'échangeur de la PAC ou un échangeur intermédiaire pour une boucle d'eau froide alimentant une ou plusieurs PAC.

Cet échangeur intermédiaire transfère la chaleur ou le froid, de la boucle d'eau ouverte vers la boucle fermée dans le bâtiment et permet ainsi, d'isoler la pompe à chaleur de l'eau du puits pour protéger les échangeurs de chaleur de la corrosion, de l'encrassement et de l'abrasion. En sortie de l'échangeur intermédiaire, l'eau est injectée dans le même aquifère grâce à un second puits appelé puits d'injection.

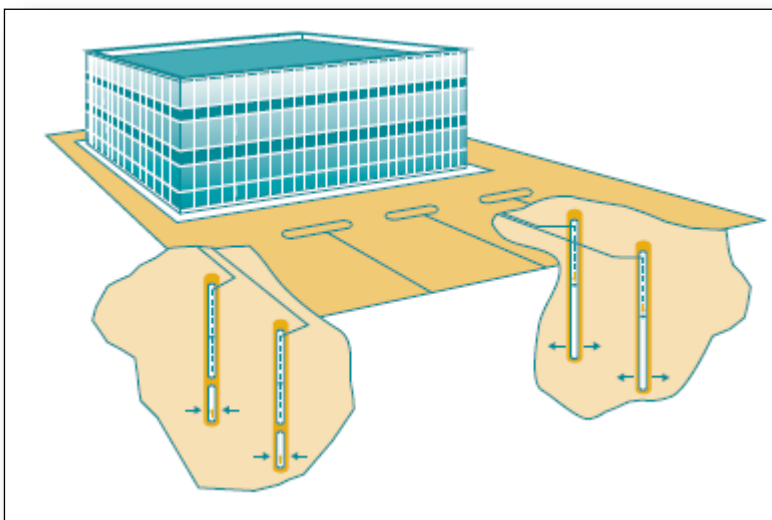


Figure 3 : Système de pompes à chaleur d'aquifère (Source CSTB).

Il existe deux configurations de ce système en fonction de l'écoulement de la nappe :

- Si l'écoulement de la nappe est rapide, la configuration sera plutôt même puits de production été et hiver, seul le puits producteur est équipé d'une pompe d'exhaure.
- Si l'écoulement de la nappe est faible ou inexistant, la configuration possible sera que 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.

Il existe une variante de PAC sur aquifère, les pompes à chaleur d'eau de surface :

Elles constituent une option techniquement et économiquement viable. Dans cette variante, une série de tuyaux installés en boucle (ou spirale) sont immergés au fond d'un lac ou d'un étang et font office d'échangeur de chaleur. Ce type d'installation requiert un minimum de tuyaux et d'excavation, mais l'étang ou le lac doit être assez vaste et profond. Le fluide caloporteur est pompé dans les tuyaux en boucle fermée ce qui évite la majeure partie des impacts sur le milieu aquatique. De nombreux systèmes de ce type sont en opération actuellement.

Liste des EQs utilisant cette technologie :

Lyon Confluence (France) (<http://www.muuuz.com/2011/02/14/le-cube-orange-par-jacob-macfarlane/>)

Opérateurs (nom et nature)

Aucun acteur pour cette technologie identifié dans l'étude détaillée de NEXUS.
 Acteur historique en France : Le BRGM, établissement public de référence pour les sciences de la Terre et L'ADEME ; Les leaders industriels en région parisienne, Dalkia et la CPCU (filiale de COFELY qui exploite une installation de 14 MW à Paris qui n'utilise pas de PAC mais directement la température du sol).

Conception
 Réalisation

Exploitation

Variantes des solutions retenues dans les EQs :

Pas de solution de stockage d'électricité par accumulateur dans l'étude détaillée de NEXUS.

Domaines pertinents

La mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) utilisant comme source froide les nappes d'eau souterraine, sur un bâtiment sera d'autant plus performante que la conception de ce dernier sera faite avec des systèmes basse température en particulier pour le chauffage.

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

- Dans l'utilisation générique des PACs, 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.
- D'autres applications privilégient la réversibilité des PACs, 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 PAC 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.

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, ...).

Limites d'utilisation

La géothermie fait partie des énergies dites « renouvelables ».

Le but d'une exploitation de l'énergie géothermique est de capter la chaleur des profondeurs, pour l'amener à la surface de la terre en recourant à des technologies ad hoc. A certains endroits, la nature fournit elle-même le système de circulation requis, par exemple les sources thermales. En d'autres lieux, on doit faire appel à des forages avec pompes de production ou à des sondes géothermiques doublées de pompes de circulation.

Pour les PAC sur aquifère, il faut apporter une grande attention à la gestion de l'aquifère : prélèvement contrôlé, rejet maîtrisé, Il peut y avoir des risques de pollution, de réchauffement irréversible de la nappe,

La géothermie de basse et moyenne énergie concerne l'exploitation des aquifères à des profondeurs élevées

Segment	Principaux équipements / systèmes utilisés	Température de la ressource	Profondeur des forages	Usages
Très basse énergie	Pompes à chaleur géothermiques (PACg)*	o < 30°C	o Faible o < 100 – 300m	o Usage domestique (chauffage & refroidissement) o Habitat collectif o Tertiaire
Basse énergie Moyenne énergie	Réseaux de chaleur géothermiques**	o < 90 °C o 90 – 150 °C	o Intermédiaire o < 2000m	o Usage direct pour le chauffage d'un ensemble de bâtiments o Chaleur industrielle o Production d'électricité
Haute énergie	Centrales de production électrique***	o >150°C	o Elevée o > 2000m	o Production d'électricité o Chaleur industrielle

Tableau 2 : Segmentation de la géothermie (source Direction Générale de l'Énergie et du Climat)

* D'autres systèmes font également partie de ce segment : les puits canadiens ou provençaux (alimentation du bâtiment en air tempéré passant par un conduit enterré) et les fondations thermoactives ou pieux géothermiques (capteurs de chaleurs installés au coeur des fondations)

	<p>du bâtiment).</p> <p>** D'autres systèmes utilisés concernent les usages agricoles (serres agricoles, pisciculture, etc.) et industriels.</p> <p>*** La géothermie de haute énergie peut également servir à de la cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité) ou à la production de vapeur haute pression pour un industriel.</p>
Contribution à la mutualisation des besoins	<p>Les PACs sur aquifère peuvent être installées pour satisfaire les besoins de plusieurs bâtiments via un micro réseau de chaleur ou une boucle d'eau froide alimentant les PACs situées dans différents bâtiments.</p> <p>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. 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.</p> <p>Il n'est en effet pas toujours pertinent de chercher à couvrir la totalité des besoins avec la solution PAC sur nappe.</p>
Stockage d'énergie	<p>Les deux exemples ci-dessous sont donnés lorsque l'écoulement de la nappe est faible ou inexistant.</p> <p>Héliogéothermie : Le « dopage » thermique de l'aquifère peut 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. En région Ile-de-France, le rayonnement solaire apporte 1 200 kWh/an/m² (de capteur) à comparer aux 50 kWh/m² (de surface habitable) 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 (attention au niveau des températures) de chauffer un immeuble de 6 étages équipé de capteurs sur toute la surface du toit.</p> <p>Stockage à partir de serres horticoles : Deux forages sont creusés de chaque côté de la serre que l'on appelle un doublet. Les deux puits du doublet sont équipés d'une pompe d'exhaure. C'est le principe du puits chaud – puits froid. L'hiver 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.</p>
Coût d'investissement (€/kW)	<p>Les valeurs indiquées ci-après relèvent des moyennes calculées à partir d'opérations récentes de l'ordre de 10 000m² (voir bilan énergétique dans la partie « Détails qualitatif »), en général en milieu urbain avec contraintes (Source ADEME – Guide technique PAC sur aquifère de février 2008) :</p> <p>Pour les forages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Etude et maîtrise d'œuvre (étude de faisabilité, dossier de déclaration, maîtrise d'œuvre, test hydrogéologiques) : 12 000 à 20 000 €HT - Forages seuls (hors équipements, réseaux, électricité...) : 800€ à 2 000 €HT/ml - Équipements (pompes, capteurs...) : 25 000 à 70 000 €HT pour un débit compris entre 60 et 100 m³/h (soit une puissance calorifique entre 625 et 1045kW) <p>Pour la PAC :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût entre 250 et 350€HT/kW (pose et mise en service avec les raccordements)
Charges de fonctionnement (€/kWh)	<p>Tous les équipements liés au forage (Source ADEME) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cout annuel d'un contrat de maintenance des puits et équipements : 1 500 à 3 000 €HT

Et de manière exceptionnelle, à une fréquence entre 10 et 15 ans :

- **Examen endoscopique** par vidéo : 2 500 €HT
- **Dépose des pompes et colonnes pour examen** et éventuel détartrage : 8000 €HT

Maintenance de la PAC :

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

Tableau 3 : Coûts estimatifs de la maintenance du poste pompe à chaleur (Source ADEME – Guide technique PAC sur aquifère)

*Maintenance type P2 : comprend en général les prestations de conduite, de surveillance et de réglage des installations, le petit entretien courant et les consommables

Redevance (Source ADEME – Guide technique PAC sur aquifère) :

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.

Niveau de maturité

Pour aborder le niveau de maturité des PACs sur aquifère, il faut se rapporter à l’énergie gratuite et renouvelable amenée par la géothermie.

Ainsi la géothermie est certainement la filière qui présente le plus large spectre d’activités : production de chaleur, production d’électricité, production de chaleur sur réseau, production de chaleur individuelle.

En Europe, la géothermie est la troisième source d’énergie renouvelable derrière l’hydraulique et la biomasse. Elle est davantage utilisée pour produire de la chaleur que de l’électricité.

Détails qualitatif

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.

Pour avoir un ordre de grandeur sur la puissance d’un système PAC sur aquifère, 1 MW de besoin en chaud pour les bâtiments de grande taille (type hôpital par exemple) représente un débit de puit(s) d’environ 100 m3/h.

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.

Bilan Energétique

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.

Surface m ²	Besoins chauffage	Besoins rafraichis- sment
1	80 kWh/m ²	20 kWh/m ²
10 000	800 000 kWh	200 000 kWh

Tableau 4 : Besoins en chaud et en froid d'un immeuble de bureau de 10 000 m²

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 rafraichissement 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 ditrib.	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
	Rafraichissement été	83 542	0	101 704	101 704
	Électricité pom- page	18 750	25 000		
	Total énergie finale	369 627	292 335	475 973	101 704 (elec) 1 161 946 (gaz)

Tableau 5 : Bilan en énergie finale des 3 configurations comparées

Ce bilan est largement favorable à la solution PAC eau – eau par rapport à une solution de référence (gaz + groupe froid). Les résultats sont indicatifs, les consommations annexes et l'électricité de pompage dépendent fortement des conditions d'exploitation de l'installation.

Un rapport de 2010 du BRGM et d'ES-GEOTHERMIE pour le compte de la DREAL-ALSACE, sur l'état des lieux de la filière « Géothermie » en ALSACE, donne les avantages et inconvénients de la géothermie PAC sur aquifère suivants :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage et rafraîchissement possibles avec une même installation, • Bon coefficient de performance par rapport à une PAC air/eau, • Technologie éprouvée, • De nombreuses références, • Filière structurée, • Aide du Fonds Chaleur pour les projets supérieur à 50 kW / Crédit d'impôt pour le particulier, 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'un aquifère peu profond avec un débit d'exhaure suffisant, • Demande une étude hydrogéologique détaillée, • Procédure d'autorisation selon code de l'environnement si exploitation supérieure à 200 000 m³/an ou 80 m³/h, • Procédure d'autorisation minière si les forages dépassent 100 m, • Problèmes possibles d'entartrage, de floculation ou de corrosion du circuit hydraulique lié à la qualité de l'eau souterraine, • Risque de durcissement de la législation sur l'eau,

	<ul style="list-style-type: none">• Risque de conflit d'usage (agriculture, captage AEP...),
--	--