

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.

L'utilisation de systèmes thermodynamiques pour assurer soit le chauffage seul, soit le chauffage et le rafraîchissement de locaux, est un procédé plus complexe et nécessitant des compétences particulières et une pluridisciplinarité. 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 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. La France a l'avantage de receler sur l'essentiel de son territoire des aquifères de bonne qualité pouvant servir de source de chaleur ou de rafraîchissement.

La filière pompe à chaleur sur aquifère 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.

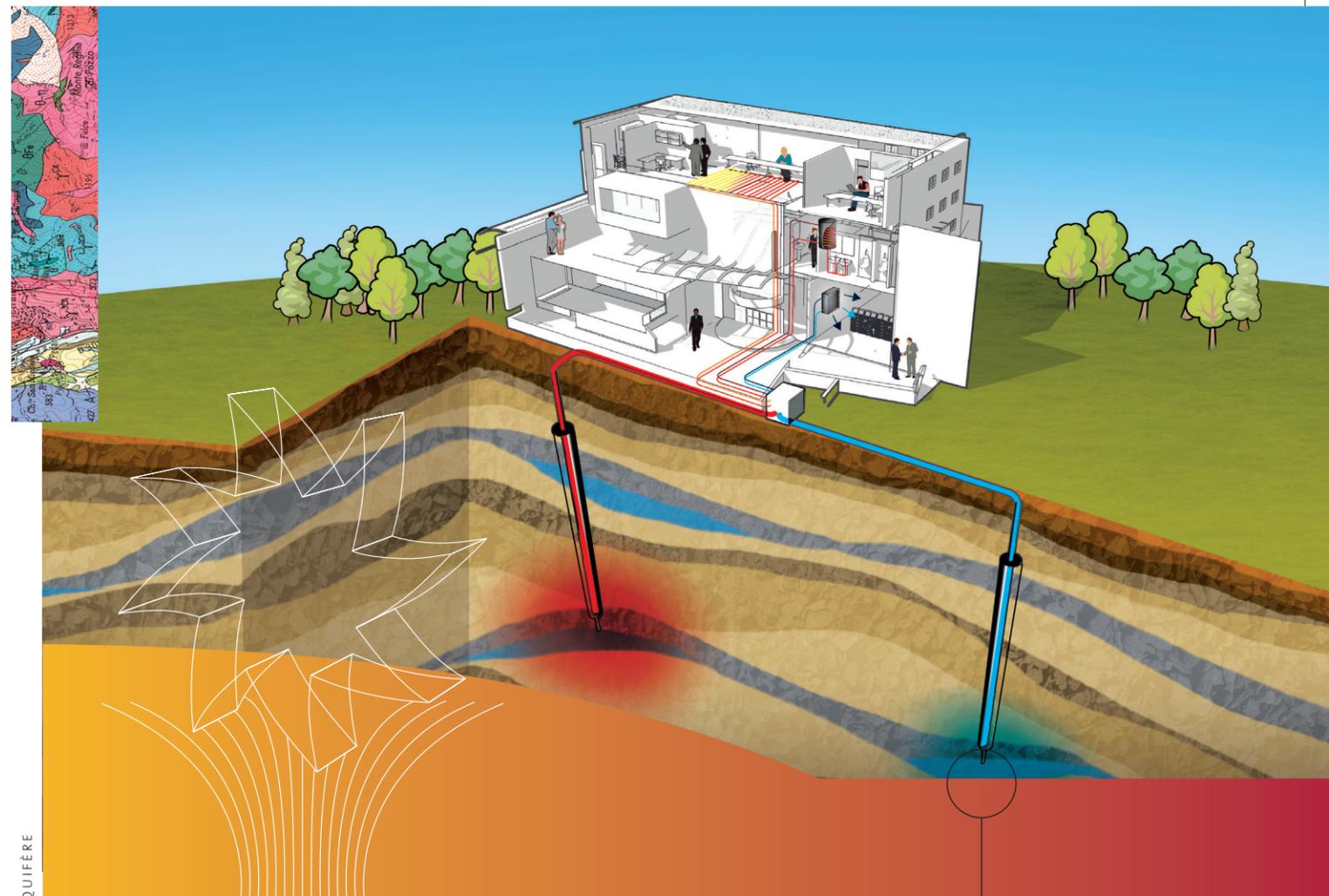
ADEME
Siège social
20, avenue de Grésillé
BP 90406
49004 Angers Cedex 1
Tél. : 02 41 20 41 20
www.ademe.fr

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

Réf. ADEME : 7220
Réf. BRGM : STC007

9 782715 925328
Prix : 45 €

www.geothermie-perspective.fr



LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES À PARTIR DE FORAGE SUR AQUIFÈRE

COLLECTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

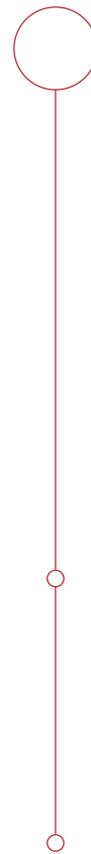
Guide technique

Les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère

Manuel pour la conception et la mise en œuvre

Les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère

Manuel pour la conception
et la mise en œuvre



Guide coédité par l'ADEME et le BRGM

Coordinateur du projet : Pascal Monnot (BRGM)

Comité de rédaction :

ADEME : Norbert Bommensatt, Astrid Cardona-Maestro

BRGM : Cécile Chéry, Pascal Monnot

EDF R&D : José Naveteur

Auteurs :

Jean-Yves Ausseur (Antéa), Sophie Bezelgues-Courtade (BRGM), Georges Bollard (CIAT), Norbert Bommensatt (ADEME), Astrid Cardona-Maestro (ADEME), Gratien Dieudonné (Pontignac), Daniel Gourmez (Alto), Jean-Claude Martin (BRGM), Pascal Monnot (BRGM), Christophe Reiss (Ventilone), Peter Riederer (CSTB).

Avec la collaboration de :

Alain Desplan (BRGM), Philippe Laplaige (ADEME), Mikael Philippe (BRGM), Charles Maragna (BRGM), Pierre Durst (BRGM)

Rédacteur : Michel Zelveder (Mz Éditions)

Maquette et réalisation : Chromatiques éditions, Paris

Illustration : Baptiste Laurent (Bros-Communication), Olivet

Couverture : illustration à titre indicatif (Chromatiques éditions)

Impression : BEDI OUDIN, Poitiers

ISBN : 978-2-7159-2532-8, mars 2012 – Réf. ADEME : 7220, mars 2012 – Réf. BRGM : STCo07.



Imprimé avec des encres végétales sur du papier provenant d'une forêt durablement gérée par un imprimeur certifié PEFC et qui, conformément à la marque Imprim'Vert®, n'utilise pas de produits toxiques, sécurise le stockage des produits et déchets dangereux et organise leur collecte.

Synthèse

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*.

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 ont par ailleurs la particularité d'associer deux secteurs d'activité qui n'ont *a priori* rien pas de rapport direct : 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 des contraintes spécifiques, il n'en demeure pas moins vrai que la pompe à chaleur géothermique 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 la double fourniture de chaud et de froid sont particulièrement adaptées aux bâtiments du secteur tertiaire où les besoins en rafraîchissement sont souvent indispensables.

Le secteur tertiaire est important en France et le développement des PAC réversibles géothermiques constitue une solution qu'il est important d'examiner à l'occasion de programmes neufs ou de réhabilitation. La France a 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.

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 est consultable sur l'espace régional du site : www.geothermie-perspectives.fr

La filière pompe à chaleur géothermique 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 et de mentionner les principales normes auxquelles il se réfère.

* Se reporter au lexique page 85.

Sommaire

Présentation synthétique d'un système type pour une opération de géothermie sur aquifère 8

- ① Le système d'échange d'énergie dans le sous-sol9
- ② Avantages des systèmes géothermiques sur aquifère 9

Les systèmes géothermiques sur aquifère 10

- ① Principe général..... 10
- ② Éléments constitutifs du système géothermique sur aquifère 10
 - 2.1 Échangeur géothermique – les différents dispositifs 10
 - 2.2 La pompe à chaleur13
 - 2.3 Distribution dans le bâtiment15

Choix du système d'échange (sol ou aquifère) en fonction des caractéristiques et de l'implantation du projet..... 16

- ① Choix du système en fonction de la ressource exploitable (sol – aquifère)..... 16
- ② Choix du système en fonction des besoins énergétiques à couvrir17
- ③ Critères technico-économiques supplémentaires 17
- ④ Restrictions techniques et réglementaires d'implantation de l'échangeur 18
- ⑤ La maintenance 18
- ⑥ Conclusion 19

Différents types d'usage et de fonctionnement de la pompe à chaleur20

- ① Une offre étendue 20
- ② Précautions d'usage21
- ③ Production de chaud (chauffage)21
- ④ Production d'eau chaude sanitaire21
- ⑤ Rafraîchissement par geocooling 22
- ⑥ Production de froid 23
- ⑦ Production de chaud et de froid (thermofrigopompe) 23

Détermination et optimisation des besoins..... 27

- ① Détermination des besoins..... 27
 - 1.1 Eau chaude sanitaire.....28
 - 1.2 Chauffage – déperditions statiques28
 - 1.3 Chauffage – déperditions volumiques.....28
 - 1.4 Besoins de froid29

2	Exigences de la RT 2012	29
2.1	Coefficient Bbio	29
2.2	Caractéristiques thermiques minimales – ponts thermiques	30
2.3	Limitations des consommations énergétiques.....	31
3	Réglementation thermique des bâtiments existants	32
4	Préconisations visant à limiter les besoins	32
4.1	Réduire les besoins de chauffage	32
5	Taux de couverture suivant la ressource accessible	37
5.1	Choix du taux de couverture.....	38
5.2	Exemple de choix de taux de couverture (étude du projet du Collège des Bernardins).....	38
5.3	Réhabilitation	39
	Conception des installations de surface	40
1	Principes généraux.....	40
2	Choix des émetteurs.....	40
2.1	Émetteurs à eau (chaud et froid)	40
2.2	Émetteurs à air	41
3	Distribution dans le bâtiment.....	43
4	Régulation de l'émission	43
4.1	Lois de régulation dites lois de l'eau	43
4.2	La régulation en pratique.....	44
5	Bilan énergétique.....	45
6	Simulation thermique dynamique du bâtiment.....	45
	Caractéristiques du sous-sol.....	48
1	Paramètres du réservoir	48
1.1	Porosité.....	48
1.2	Perméabilité	49
1.3	Transmissivité.....	50
1.4	Pression hydrostatique du gisement.....	50
1.5	Température.....	51
2	Paramètres du fluide.....	51
2.1	Les colmatages.....	52
2.2	La corrosion	52
3	Potentiels géothermiques des aquifères en France	53
	Dimensionnement d'une solution PAC sur aquifère	56
1	Principes de dimensionnement d'un doublet	56
2	Le temps de percée	56
3	Le taux de recyclage.....	56
4	Paramètres à prendre en compte	57
5	Logiciels de dimensionnement de l'échangeur géothermique.....	57

Mise en œuvre d'une solution PAC sur aquifère.....58

1 Outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur géothermiques sur aquifère	58
2 Principales caractéristiques de l'aquifère	58
3 Analyse hydrogéologique du site	59
4 Équipements du forage	59
4.1 Colonne captante.....	59
4.2 Crépines	60
4.3 Centreurs	60
4.4 Massif de gravier.....	60
4.5 Cimentation.....	60
4.6 Équipement de la tête de forage	61
5 Le développement du forage.....	61
6 Les pompages d'essai.....	61
6.1 L'essai de puits ou essai par palier	62
6.2 L'essai de nappe ou essai longue durée	62
7 Pompe de forage	63
8 Conditions de rejet des eaux	63
8.1 Le rejet dans l'aquifère d'origine.....	63
8.2 Le rejet en surface	63
9 Analyse comportementale de la nappe.....	63
10 Procès-verbal de réception de l'ouvrage.....	64
11 Mise en exploitation, contrôle du bon fonctionnement.....	64

Exploitation, suivi et maintenance65

1 Surveillance et entretien des installations de surface	65
2 Surveillance et entretien du doublet de forages.....	66
2.1 Paramètres à prendre en compte.....	66
2.2 Conditions d'une surveillance efficace.....	66
2.3 Contrôles périodiques à effectuer	66
2.4 Entretien.....	67

Réglementation applicable à la réalisation de forage sur aquifère..... 68

1 Le code minier.....	68
2 Le code de l'environnement.....	69
3 Le code de la santé publique	70
4 Le code général des collectivités territoriales.....	70
5 Le code civil	71
6 Redevance pour prélèvement sur la ressource eau	71

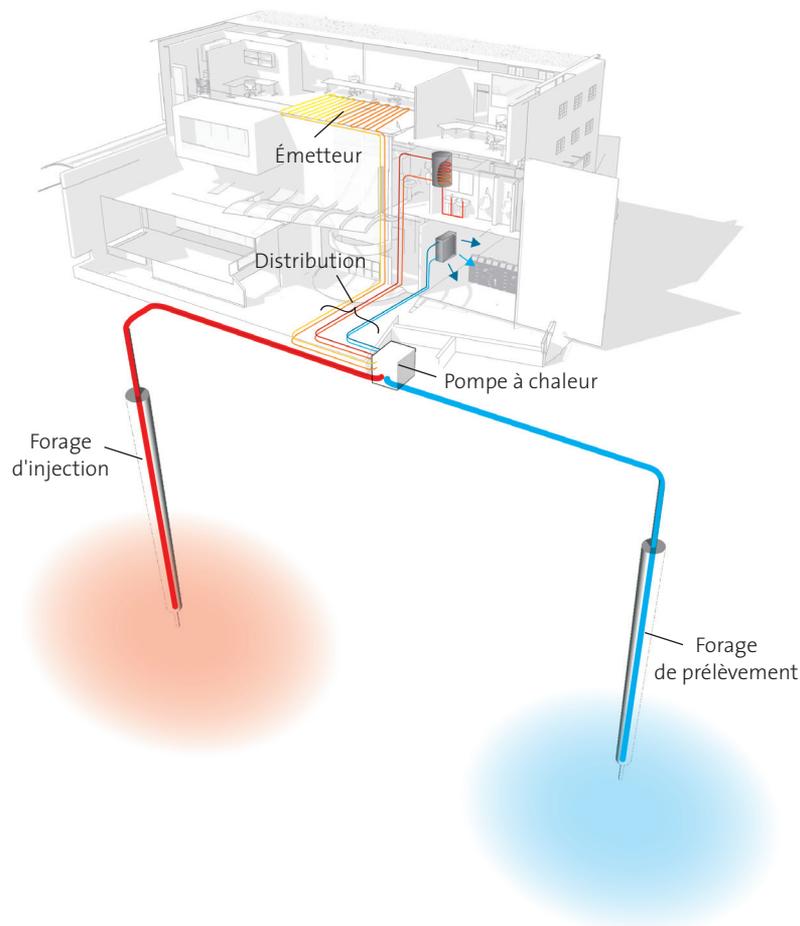
Mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives	72
1 Garantie Aquapac® pour les opérations de pompes à chaleur sur aquifères	
superficiels	72
2 Les aides financières	72
2.1 Le crédit d'impôt.....	72
2.2 Le Fonds chaleur.....	73
3 Certificats d'économie d'énergie	74
Aspects économiques	75
1 Système géothermique sur aquifère.....	75
1.1 Études et maîtrise d'œuvre	75
1.2 Forages et équipements	75
1.3 Maintenance	76
2 Équipements de surface.....	76
2.1 Investissements.....	76
Aspects environnementaux	77
1 L'énergie du sous-sol : une énergie renouvelable.....	77
2 Émissions de CO₂	77
3 Taux d'émission	77
4 Impact des fluides frigorigènes (PAC)	78
Domaines d'applications appropriés	79
1 Principes généraux - Choix du système.....	79
2 Retours d'expériences.....	80
Centre des congrès de Reims (Marne)	80
Centre national du costume de scène de Moulins (Allier).....	81
Points à retenir pour l'installation d'une PAC géothermique	
sur aquifère	82
Annexe : déroulement d'une opération de pompe à chaleur géothermique	
sur aquifère	83
Pour en savoir plus	84
Lexique	85
Bibliographie	90

Présentation synthétique d'un système type pour une opération de géothermie sur aquifère

Un système géothermique permet le transfert de chaleur ou de froid depuis le sous-sol vers des locaux à chauffer ou à refroidir, par association :

- d'un système d'échange d'énergie dans le sous-sol (généralement appelé échangeur géothermique) qui est, dans le cas d'un système sur aquifère, composé d'un ou de plusieurs forages de pompage et d'un ou de plusieurs forages de rejet ;
- d'une pompe à chaleur (PAC) ;
- d'un échangeur entre l'eau de forage et la PAC ;
- d'un système de distribution et d'émission d'énergie dans les locaux.

Les trois principaux éléments de la PAC géothermique sur aquifère.



① Le système d'échange d'énergie dans le sous-sol

Le rôle de l'échangeur géothermique est de puiser ou d'injecter l'énergie dans le sous-sol et de l'acheminer jusqu'à la pompe à chaleur.

On distingue deux principaux types de systèmes d'échange :

- les systèmes sur sol¹ ;
- les systèmes sur eau de nappe (ou sur aquifère) ; c'est ce système qui est détaillé dans le présent manuel, en particulier les systèmes d'échange d'énergie sur doublets* de forages d'eau.

② Avantages des systèmes géothermiques sur aquifère

Les principaux avantages des systèmes géothermiques sur aquifère sont :

- leur stabilité en termes de rendement :
 - lorsqu'ils sont correctement dimensionnés, les systèmes géothermiques sur aquifères sont plus performants que les systèmes aérothermiques, du fait des variations moindres de la température de la source d'énergie utilisée (température de la nappe vs température de l'air) ;
 - les pertes thermiques dans le réseau hydraulique sont limitées du fait de l'utilisation de la basse température ;
- leur aspect écologique permettant de valoriser une énergie renouvelable ;
- leur possibilité de faire du rafraîchissement gratuit et direct par le sol, par by-pass de la pompe à chaleur : geocooling*, aussi appelé free cooling.

¹ – Voir le manuel intitulé « Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes – Manuel pour la conception et la mise en œuvre ».

Les systèmes géothermiques sur aquifère

1 Principe général

La géothermie sur aquifère consiste à pomper l'eau d'une nappe souterraine* par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs forages pour l'acheminer (*via* un échangeur) jusqu'à la pompe à chaleur afin d'en prélever les calories, avant de la réinjecter dans l'aquifère par l'intermédiaire d'un second ou de plusieurs forages.

Cette solution est directement assujettie aux contraintes hydrogéologiques du site, en termes de disponibilité et de qualité de la nappe souterraine au droit du projet.

2 Éléments constitutifs du système géothermique sur aquifère

2.1 Échangeur géothermique – les différents dispositifs

Compte tenu de la température des nappes superficielles (12-15 °C), les calories destinées au chauffage sont extraites par PAC à partir des eaux prélevées par forage. Le même principe est appliqué en sens inverse pour le rafraîchissement.

Parmi les différents modes d'exploitation thermique des eaux d'un aquifère, il faut distinguer plusieurs dispositifs.

• Le puits unique (à éviter)

L'eau de la nappe, prélevée à sa température naturelle, est rejetée dans un réseau de surface (rivière, plan d'eau, réseau pluvial) après extraction de ses calories ou frigories. Ce type d'exploitation est utilisé notamment lorsque la salinité du réservoir ne dépasse pas 2,5 g/l. Une exploitation intense n'est possible que si une réalimentation naturelle vient restituer les volumes d'eau exploités.

Plus économique qu'une solution avec réinjection de l'eau, ce type de prélèvement est cependant plus impactant pour l'équilibre hydraulique de la ressource. **La gestion actuelle des ressources en eaux souterraines et superficielles tend à limiter les rejets en surface et l'usage du puits unique est de ce fait de moins en moins favorisé.**

• Doublet de forage pour le chauffage ou le rafraîchissement

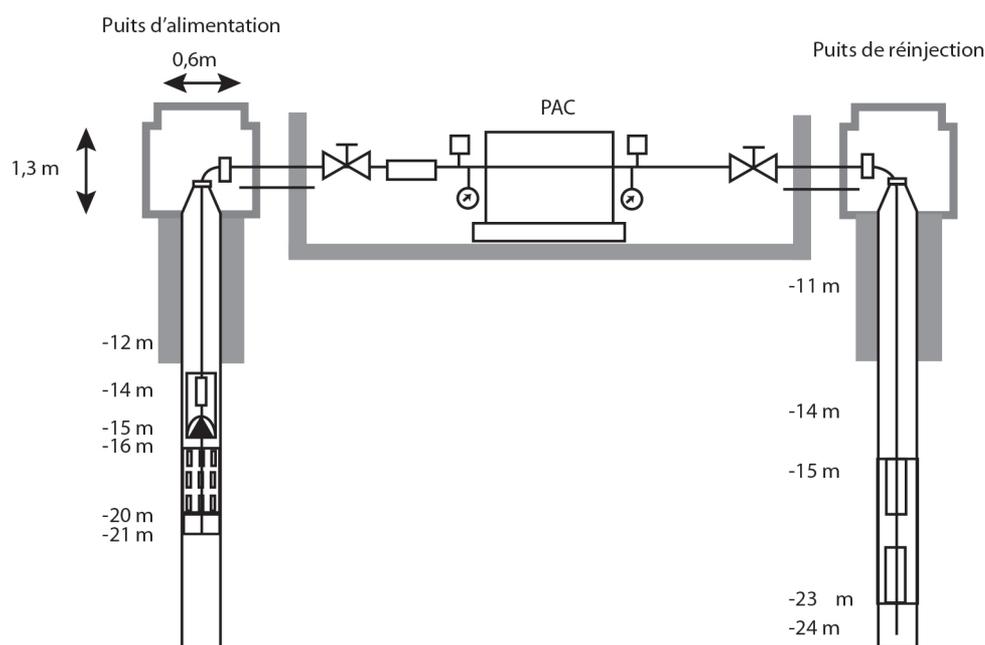
L'eau de la nappe prélevée à sa température naturelle par un forage dit « producteur » est réinjectée par un second forage dit « injecteur », après exploitation de ses propriétés thermiques. **C'est le dispositif le plus courant.**

La réinjection de l'eau refroidie (ou réchauffée) implique la formation d'un front thermique (froid ou chaud) dans l'aquifère qui participe au refroidissement (ou au réchauffement) du fluide exploité et peut parvenir au puits de production à l'issue d'un temps de fonctionnement (temps ou date de percée) plus ou moins long. C'est pourquoi le dimensionnement du doublet doit tenir compte de son impact hydraulique et thermique. Celui-ci peut être évalué grâce à l'utilisation d'outils de modélisation permettant de simuler le fonctionnement d'un doublet.

La réalisation d'un doublet n'est donc possible qu'en l'absence de recyclage important des eaux réinjectées jusqu'au puits de production :

- soit parce que les deux ouvrages sont suffisamment éloignés pour que le recyclage ne se produise qu'une fois l'installation rentabilisée ;
- soit parce que l'écoulement régional est assez puissant (vitesse d'écoulement de l'ordre de plusieurs mètres par an) pour entraîner par advection les eaux froides (ou chaudes) réinjectées, hors de portée du puits de production. C'est souvent le cas des nappes d'accompagnement des cours d'eau.

Exemple de dispositif du doublet géothermique (d'après J.-P. Sauty et J.-Y. Ausseur, 1982).



Les paramètres d'exploitation nécessaires à l'évaluation des impacts hydrauliques et thermiques des doublets géothermiques sur les aquifères superficiels sont :

- la distance entre les puits ;
- l'orientation du doublet par rapport à la direction d'écoulement souterrain ;
- les débits d'exploitation (prélèvement et injection en m³/h) ;
- la température d'injection ;
- les durées d'exploitation.

Couplés aux caractéristiques hydrauliques et thermiques de l'aquifère, ces paramètres permettent d'évaluer le rayon d'influence hydraulique et thermique du doublet. Ils permettent également de calculer le temps de percée d'une installation, l'évolution de la température de l'aquifère au droit du forage de production et donc sa durée de vie.

Dispositifs particuliers

• Puits multiples

Ce dispositif fonctionne sur le même principe que le puits simple et que le doublet, mais concerne des installations nécessitant des débits élevés. Il consiste à multiplier le nombre de forages producteurs et injecteurs pour obtenir le débit souhaité. Certaines installations nécessitant de gros débits peuvent faire appel ainsi à des batteries de forages de production et de réinjection. Les sommes des débits pompés et injectés doivent être équilibrées.

• Doublet vertical

Ce dispositif exploite un aquifère à des profondeurs différentes et sur une même verticale. L'exploitation d'une nappe épaisse présentant une ressource en eau importante, mais avec une faible perméabilité (cas de la nappe du Rhin à Strasbourg) peut être facilitée par la mise en œuvre de deux puits forés sur une même verticale, avec exploitation de la nappe à des profondeurs différentes. Ce type de doublet a la particularité d'avoir une emprise minimale au sol, ce qui est un critère favorable dans les milieux urbanisés (mise en place par exemple dans une cour d'immeuble).

• Doublet de stockage à puits chaud et puits froid

Le niveau énergétique d'un aquifère peut être amélioré ou préservé par la mise en œuvre de méthodes de stockage d'énergie. Une zone chaude et une zone froide sont respectivement constituées autour de chacun des deux ouvrages. Ceux-ci sont alternativement l'objet d'injections et de pompages suivant les phases d'exploitation. La disjonction des deux stocks permet de mieux protéger leur contenu énergétique ; ce système est particulièrement adapté au stockage si l'écoulement de la nappe est suffisamment faible. Cependant, dans le cas des aquifères superficiels, le stockage énergétique est difficilement réalisable du fait des écoulements généralement non négligeables. Le niveau énergétique d'exploitation d'un forage en saison froide est amélioré par l'injection préalable d'eau chaude en période d'énergie excédentaire (héliogéothermie pour le stockage de calories solaires).

• Doublet de stockage

Les puits de prélèvement et d'injection sont inversés selon les saisons et les besoins de fonctionnement en mode rafraîchissement ou chauffage. En hiver, l'injection de l'eau après exploitation en mode chauffage crée une bulle froide autour du puits d'injection. Cette bulle est ensuite exploitée l'été en mode rafraîchissement. Le puits injecteur devient alors producteur et la réinjection de l'eau après exploitation crée une bulle chaude autour du puits injecteur qui sera exploitée l'hiver suivant. Ce dispositif de stockage énergétique ne peut fonctionner que dans un contexte à écoulement lent.

• Stockage par puits unique

Ce dispositif prévoit l'injection d'eau chaude en été pour permettre son prélèvement en hiver pour le chauffage ou inversement, l'injection d'eau fraîche en hiver pour récupération en été et usage de rafraîchissement.

• Doublet à balayage

Le doublet de forage est exploité pour assurer le rafraîchissement en été et le chauffage en hiver. Les eaux sont toujours prélevées par le même forage de production et réinjectées par le même forage de réinjection. Le doublet fonctionne toute l'année ; l'eau prélevée en hiver est injectée à une température inférieure, ce qui crée une bulle froide autour du puits d'injection, tandis que l'été, l'eau prélevée est injectée à une température supérieure, ce qui crée une bulle chaude autour du puits d'injection. Des ondes alternativement chaudes et froides balayent la nappe. Ce dispositif permet de maintenir une température moyenne dans le réservoir (régénération de son niveau énergétique).

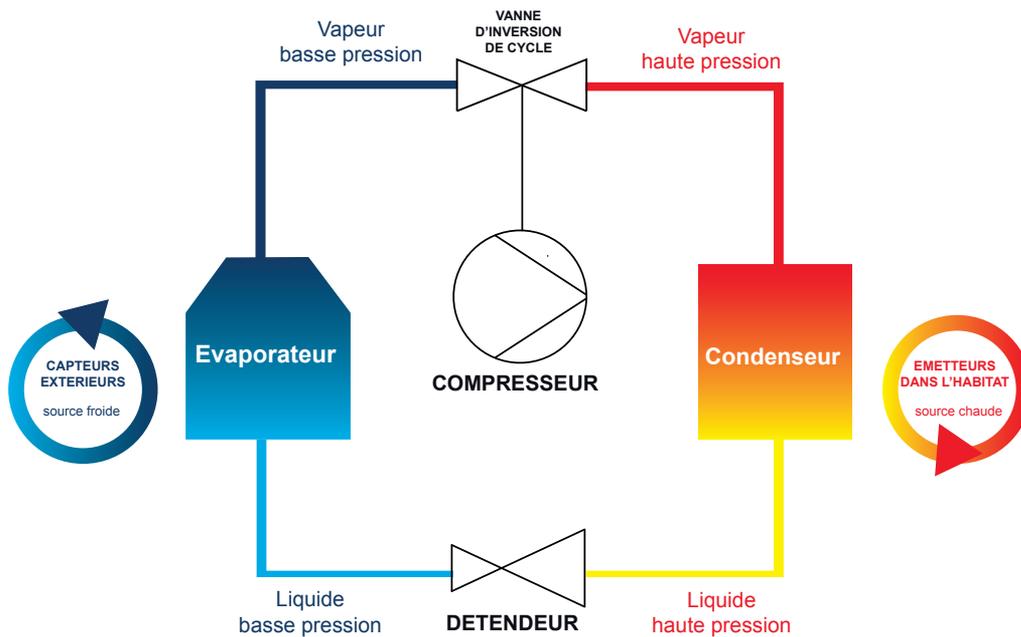
• Triplet

Trois forages sont alignés dans la direction de l'écoulement régional de la nappe. Le prélèvement est réalisé sur le forage central ; l'injection (eau fraîche) est réalisée sur le forage aval en hiver et sur le forage amont en été. Ce dispositif permet de maintenir le potentiel énergétique de l'aquifère.

2.2 La pompe à chaleur

La pompe à chaleur constitue l'organe central du système géothermique, puisque c'est elle qui va assurer le transfert d'énergie entre le sous-sol et les locaux. Son principe de fonctionnement s'apparente à celui du réfrigérateur. Elle prélève de l'énergie dans un milieu à faible température (l'intérieur du réfrigérateur ou comparativement le sous-sol) et elle restitue cette énergie dans un autre milieu à une température plus élevée (échangeur extérieur sur le dos du réfrigérateur ou comparativement les émetteurs des locaux à chauffer). Son fonctionnement repose pour l'essentiel sur l'exploitation des propriétés thermodynamiques des fluides et gaz frigorigènes soumis à des opérations de compression et de détente successives (cycle thermodynamique).

Schéma de fonctionnement d'une PAC.



PAC, installation à Mandailles-Saint-Julien (15).



© CC Qualit'EnR 2010 / SARL Semete et fils - Jean-Louis Semete

Une PAC réversible permet de chauffer ou de rafraîchir un bâtiment. En mode rafraîchissement, elle fonctionne de la même manière qu'un réfrigérateur : l'intérieur du réfrigérateur correspond alors au bâtiment, l'échangeur extérieur du réfrigérateur correspond à l'échangeur géothermique (doublet de forages). En mode chauffage (ou production d'eau chaude sanitaire (ECS), le sens s'inverse : c'est alors le bâtiment qui correspond à l'extérieur du réfrigérateur (on évacue des calories) et l'échangeur géothermique qui représente l'intérieur du réfrigérateur.

En terme de puissance, la puissance thermique récupérée au condenseur est la puissance calorifique, la puissance thermique rejetée à l'évaporateur est la puissance frigorifique, la puissance (électrique ou autre) nécessaire au compresseur pour effectuer les cycles thermodynamiques est la puissance absorbée.

La puissance calorifique, la puissance frigorifique et la puissance absorbée sont liées. Cependant, seule la puissance absorbée est celle qui est réellement coûteuse en exploitation : ainsi, pour une même puissance calorifique, par exemple, on tentera de trouver le mode de fonctionnement permettant de minimiser la puissance absorbée.

Chaque PAC possède ses caractéristiques propres. En fonction des régimes de température appliqués à l'évaporateur et au condenseur, la puissance calorifique, la puissance frigorifique et la puissance absorbée varieront selon le modèle. De manière générale, plus l'écart entre le régime de température à l'évaporateur et le régime de température au condenseur est réduit, plus la performance sera élevée (donc la puissance absorbée réduite, pour une même puissance calorifique développée en mode chauffage, par exemple). Ainsi, par exemple, une PAC présente les caractéristiques suivantes :

- pour un régime entrée/sortie évaporateur de 7 °C/2 °C et un régime condenseur de 30 °C/35 °C, la puissance calorifique est de 71 kW, la puissance frigorifique de 57 kW et la puissance absorbée de 15 kW, soit un ratio $P_{\text{calo}}/P_{\text{absorbée}}$ de 4,73 ;

- pour un régime entrée/sortie évaporateur de 7 °C/2 °C et un régime condenseur de 40 °C/45 °C, la puissance calorifique est de 68 kW, la puissance frigorifique de 50 kW et la puissance absorbée de 19 kW, soit un ratio $P_{\text{calo}}/P_{\text{absorbée}}$ de 3,57.

Ces données sont disponibles auprès des constructeurs ; elles doivent faire l'objet d'une analyse rigoureuse lors de la sélection du matériel.

2.3 Distribution dans le bâtiment

Le rôle du système de distribution est d'acheminer l'énergie aux différents émetteurs d'un bâtiment à chauffer ou à refroidir. Les systèmes géothermiques sur pompe à chaleur présentent une grande souplesse d'utilisation en autorisant une grande variété de systèmes de distribution y compris les systèmes à air, eau, centraux et répartis.

Lorsqu'un circuit de distribution est utilisé pour mutualiser le fonctionnement en mode chauffage et le fonctionnement en mode rafraîchissement (activés indépendamment l'un de l'autre), les composants qui sont utilisés en commun pour les deux modes (émetteurs, échangeurs, etc.) doivent être compatibles avec les puissances et niveaux de température propres aux deux modes.

Enfin, lorsqu'une production simultanée de chaud et de froid est demandée (soit par thermofrigopompe, soit par PAC en mode chauffage et geocooling), les circuits de chauffage et de refroidissement sont séparés ; la distribution se fait alors par un circuit 4 tubes.

Choix du système d'échange (sol ou aquifère) en fonction des caractéristiques et de l'implantation du projet

Ce paragraphe a pour objectif de comparer les critères de choix entre les deux principaux systèmes d'échange d'énergie (champ de sondes et forage sur aquifère) en fonction de la source (sol/nappe) et de présenter leurs avantages et inconvénients afin de guider le maître d'ouvrage dans un choix approprié.

La comparaison porte sur les paramètres suivants :

- le choix du système en fonction de la ressource exploitable ;
- le choix du système en fonction des besoins énergétiques à couvrir ;
- des critères technico-économiques supplémentaires ;
- les restrictions techniques et réglementaires d'implantation des échangeurs ;
- la maintenance.

1 Choix du système en fonction de la ressource exploitable (sol aquifère)

Le choix du système (champ de sondes ou forage d'eau, doublet, forages multiples) dépend essentiellement de la disponibilité et de la pérennité de la ressource en eau souterraine (débit de pointe disponible sur le long terme, accessibilité) et de sa qualité physico-chimique* (colmatage, incrustation, corrosion), ce qui implique au préalable de réaliser une étude hydrogéologique.

Deux cas peuvent alors se présenter.

- En l'absence de ressource en eau souterraine adéquate (supposée ou avérée), le choix **se porte sur le champ de sondes**. Il s'agit alors de **vérifier *in situ*, par le biais d'un test de réponse thermique**, les paramètres thermiques des terrains (conductivité thermique, capacité calorifique, température du sous-sol). Les paramètres mesurés sont utilisés dans les calculs de dimensionnement du champ de sondes ; ceux-ci permettant de statuer sur le nombre et l'espacement des sondes nécessaires au fonctionnement de l'installation.
- Si la ressource en eau est supposée exploitable (étude hydrogéologique), le choix se porte sur le forage d'eau, tout en vérifiant les critères de choix supplémentaires mentionnés ci-dessous. Si cette solution est retenue, il s'agit dans tous les cas de **vérifier² *in situ* la disponibilité et la pérennité de la ressource en eau par un ou plusieurs pompages d'essai***. Le pompage par paliers permet de caractériser les performances de l'ouvrage (courbe caractéristique de l'ouvrage) et le pompage de longue durée caractérise les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, rabattement*).

2 – Pour se prémunir des risques d'échec sur la diminution ou la détérioration de la ressource en cours d'exploitation, le maître d'ouvrage pourra avoir recours à la garantie Aquapac. Cette assurance couvre les coûts relatifs aux études préalables, forages, tests et analyses, équipement des puits. Le montant garanti est fixé par le contrat, déduction faite des subventions reçues. Cette garantie se limite aux installations de puissances supérieures à 30 kW, ainsi qu'aux aquifères situés en général à moins de 100 mètres de profondeur.

2 Choix du système en fonction des besoins énergétiques à couvrir

Si la ressource en eau s'avère exploitable à un coût inférieur à celui d'un champ de sondes, pour couvrir les besoins, le choix pourra se porter sur la solution « forage(s) sur aquifère ».

Le principal paramètre de choix est d'ordre économique. En effet, lorsque les conditions le permettent, le forage d'eau est particulièrement adapté aux « grandes puissances ». Par exemple, un seul forage qui débite 10 m³/h fournit une puissance frigorifique³ de 70 kW ($\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$), soit une puissance calorifique de 100 kW (COP⁵ de 3,3). Pour comparaison, il faudrait un champ de 14 sondes de 100 mètres pour fournir la même puissance (hypothèse simplifiée, puissance soutirée par mètre linéaire de forage : 50 W/m).

3 Critères technico-économiques supplémentaires

Le principal critère économique se portera sur l'investissement global qui se traduit par le nombre et la profondeur des échangeurs (sondes ou forages d'eau) à réaliser pour couvrir les besoins énergétiques. Pour illustrer la variabilité de l'investissement en fonction du système choisi et de la ressource disponible, on peut reprendre l'exemple du forage d'eau qui débite 10 m³/h et fournit une puissance calorifique de 100 kW. Pour garantir ce débit, la profondeur du forage à réaliser va dépendre de la profondeur de la nappe et des propriétés hydrodynamique de l'aquifère (transmissivité, perméabilité du milieu), ce qui peut être un avantage ou un inconvénient économique suivant les cas. Si la nappe est profonde (par exemple 70 mètres), elle induira des coûts liés à l'énergie de pompage. La qualité de l'eau* peut également nécessiter la mise en place d'un traitement nécessitant beaucoup de maintenance.

En revanche pour le champ de sondes, c'est la variabilité des terrains et de leur conductivité thermique va influencer le nombre et la profondeur des sondes. Le test de réponse thermique permet de les vérifier sur site et d'ajuster la profondeur ou le nombre de sondes pour couvrir les besoins.

Le maître d'ouvrage pourra ainsi être confronté à **différents schémas d'échangeurs** suivant les besoins à couvrir, en fonction de l'accessibilité de la ressource en eau et de l'espace disponible sur la parcelle pour réaliser l'échangeur : un seul doublet de forage d'eau (forage de prélèvement et forage d'injection), plusieurs doublets de forages d'eau, un champ de sondes avec une surface au sol plus ou moins grande (en fonction de l'espacement des sondes) ou avec des sondes plus ou moins profondes. Ainsi, **une étude technico-économique** devra être réalisée en amont pour permettre de faire le bon choix.

3 – Puissance soutirée au sous-sol (kW).

4 – Le delta T de 6 °C pris en compte est une valeur indicative. La valeur réelle sera dimensionnée par le bureau d'étude, en fonction de la température de la nappe (température d'entrée dans la PAC en mode chauffage). Le delta T est généralement compris entre 5 et 10 °C. Le facteur limitant étant la sécurité antigel de l'évaporateur de la pompe à chaleur.

5 – On définit un coefficient de performance théorique (COP) qui est le rapport de la quantité d'énergie transmise à la source chaude (Q₂) par la quantité d'énergie mécanique dépensée (W) donc : COP chaud = Q₂/W

4 Restrictions techniques et réglementaires d'implantation de l'échangeur

Les restrictions d'implantation des échangeurs peuvent être d'ordre technique ou réglementaire. Les restrictions techniques sont principalement liées à l'implantation géométrique sur la parcelle et à l'hydrogéologie. L'espace disponible sur la parcelle peut limiter l'espacement et le nombre de sondes (interactions thermique) ou de forages d'eau (interaction hydrogéologique et recyclage thermique). En revanche, on peut noter qu'un avantage commun aux deux techniques, en comparaison avec les capteurs horizontaux par exemple, est leur faible emprise au sol, ce qui permet de les envisager dans les milieux urbains (la réglementation locale doit toutefois être prise en compte).

Des difficultés de foration* peuvent être rencontrées en présence de terrains hétérogènes (alternance de formations géologiques plus ou moins compétentes (dures), présence de zones fracturées, variabilité du pendage des couches) ou d'aquifère captif ou artésien*.

Ces difficultés sont les mêmes pour le forage d'eau ou pour le champ de sondes, étant donné qu'il y a, dans les deux cas, réalisation de plusieurs forages.

En revanche, pour le champ de sondes, peuvent s'ajouter, suivant les particularités des terrains, des difficultés pour cimenter sur toute la hauteur du forage, conformément à la NF X10-970. Il est en effet indiqué dans la norme que les zones karstiques ou présentant une forte hétérogénéité peuvent présenter des difficultés pour réaliser une cimentation* conforme. Des précautions particulières et le recours à l'avis d'un expert sous-sol (géologue, hydrogéologue) sont vivement recommandés dans les cas suivants :

- zones intensément fissurées, faillées ou bréchifiées, présentant des cavités naturelles ou anthropiques ;
- présence de roches meubles instables (roches volcanosédimentaires, pouzzolane) ;
- présence de roches présentant des risques de dissolution ou de retrait-gonflement (argiles, évaporites)⁶.

L'étude géologique préalable permet de lever les doutes.

5 La maintenance

Selon le type d'échangeur géothermique, la maintenance est totalement différente. Le forage d'eau est un système « ouvert », étant donné qu'il puise (forage de prélèvement) l'énergie directement dans l'eau souterraine qui est ensuite restituée au milieu souterrain (forage de réinjection). Le champ de sondes est au contraire un système « fermé », sans contact direct avec l'environnement. Le liquide caloporteur circule en circuit fermé et puise l'énergie dans le sol par conduction pure.

La maintenance du forage d'eau dépend essentiellement de la qualité de l'eau souterraine pompée. Suivant sa qualité physico-chimique, il faut prévoir un nettoyage périodique plus ou moins espacé : dessablage, décolmatage... De plus, un soin particulier doit être apporté à la pompe immergée qui ne devra, en aucun cas, pomper du sable ou être dénoyée. En revanche, une eau de bonne qualité (sans anomalie physico-chimique) n'engendre quasiment pas d'entretien sur le forage lui-même.

⁶ – Anhydrite, gypse, halite.

La maintenance du champ de sondes nécessite généralement peu d'entretien :

- un contrôle de la mesure du point de congélation dans le circuit primaire* est recommandé *a minima* tous les trois ans ainsi que du complément éventuel en antigel. Cette opération est généralement réalisée par l'installateur en chauffage ; le remplacement total du liquide caloporteur est recommandé tous les cinq ans ;
- une vérification de l'état des raccords en cas de détection de fuite(s) ;
- un contrôle des différents organes de régulation (pompes de circulation).

La souscription de contrats d'entretien ou de maintenance auprès d'un professionnel reconnu est vivement recommandée au maître d'ouvrage.

6 Conclusion

En conclusion, pour guider le maître d'ouvrage dans son choix, on peut lui proposer de s'orienter vers le forage d'eau, si la ressource en eau est adéquate et en particulier pour des besoins énergétiques importants. Le champ de sondes est une alternative sécuritaire qui permet de garantir, s'il est correctement dimensionné, les besoins à couvrir mais qui peut nécessiter un grand nombre de sondes et une emprise au sol plus importante que le forage d'eau.

Les deux principaux critères de choix sont la disponibilité de la ressource en eau et les résultats de l'analyse technico-économique.

En dernière variante, on peut également retenir l'idée qu'un forage d'eau qui ne délivre pas le débit escompté peut être transformé en sonde géothermique verticale. Il faudra toutefois le prévoir pour permettre l'équipement du forage en sonde avant la phase d'équipement en forage d'eau (tubes crépinés et cimentation annulaire*).

Différents types d'usage et de fonctionnement de la pompe à chaleur

1 Une offre étendue

Le choix de la pompe à chaleur est déterminant lors de la conception d'un système géothermique.

Le transfert de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur ne peut se faire que dans certaines limites, qui sont caractérisées par les régimes de température au condenseur et à l'évaporateur. Ces limites sont imposées par le modèle de PAC retenu. Il est donc nécessaire en premier lieu de s'assurer auprès des fabricants que la PAC choisie permettra de répondre aux besoins des bâtiments dans tous les cas de figure.

De manière générale, en ce qui concerne les PAC à compression électrique, qui représentent la majorité des PAC disponibles sur le marché, on trouve différents modèles plus ou moins évolués.

- Les modèles à régulation discrète, disponibles généralement pour les petites puissances, intègrent un ou plusieurs compresseurs. La puissance nominale de la PAC peut être modulée par le nombre de compresseurs mis en œuvre : ainsi une PAC de 50 kW à deux compresseurs permet des fonctionnements à 50 % de charge (25 kW) lorsqu'un seul compresseur est activé, ou à 100 % de charge (50 kW) lorsque les deux compresseurs sont activés. Lorsque la PAC ne dispose que d'un seul compresseur, la charge disponible n'est que de 100 % (fonctionnement en tout ou rien).
- Les modèles à régulation continue, disponibles généralement à partir d'une certaine puissance (supérieure à 50 kW), embarquent la régulation nécessaire pour adapter automatiquement la charge aux besoins du bâtiment. Mono ou multi compresseurs, ils permettent de réguler de manière continue la charge entre par exemple 20 % et 100 % de la puissance nominale.

La régulation elle-même est plus ou moins évoluée en fonction des modèles. Elle peut ou non intégrer la surveillance d'une température de production en chaud et/ou en froid (consigne), le pilotage des pompes de circulation des circuits condenseur et évaporateur en mode tout ou rien ou en vitesse variable, la gestion d'alarmes plus ou moins fine...

Un autre aspect de la régulation intégrée à la PAC concerne sa capacité à communiquer et à être pilotée à distance par des protocoles standard, ce qui facilite son intégration dans une installation géothermique.

En fonction de l'application, le choix de la PAC peut ainsi décharger le maître d'œuvre de certaines tâches auxiliaires, comme la mise au point d'une partie des automatismes nécessaires à la régulation de l'installation. Chaque PAC présente ainsi des caractéristiques propres en termes de puissance, de performance et de mise en œuvre, ce qui se répercute sur le coût de celle-ci. Cependant, ce coût doit être apprécié au regard des économies effectuées par ailleurs dans l'installation et lors de l'exploitation.

2 Précautions d'usage

Lors de son démarrage, une pompe à chaleur nécessite un délai minimum, afin de se mettre en condition pour produire de l'énergie de manière optimale. Ce délai est propre à chaque modèle, cependant il faut retenir que dans tous les cas, des cycles de démarrage et d'arrêt répétés (par exemple plus de 6 fois par heure de fonctionnement) sont néfastes à son bon fonctionnement et pourrait l'endommager. On a donc tout intérêt à démarrer une pompe à chaleur pour une durée la plus longue possible. De ce fait, il est contre-productif de surdimensionner une pompe à chaleur car, dans ce cas, la production de besoins modestes nécessitera des cycles de fonctionnement courts.

Pour permettre un éventail de puissance adapté, il est possible, voire recommandé dans certains cas, d'utiliser plusieurs pompes à chaleur montées en cascade, de manière à permettre une régulation de charge la plus étendue possible. Ainsi, l'utilisation de trois PAC identiques de 50 kW à deux compresseurs, permettant de moduler la charge à 50 %, 100 %, 150 %, 200 %, 250 % et 300 % de la puissance nominale de 50 kW, est préférable à une PAC de 150 kW à deux compresseurs dans le cas où les appels de puissance requis par le bâtiment varient fortement. Le montage en cascade permet en outre un fonctionnement en mode dégradé dans le cas où l'une des PAC tomberait en panne.

Enfin, la mise en régime de la pompe à chaleur, notamment au niveau du condenseur, nécessite un volume de fluide minimum dans le circuit condenseur afin de lui permettre d'effectuer un cycle court sans dommages (d'où, souvent, la nécessité d'un ballon tampon en sortie de condenseur). En première approximation, ce volume est de 15 à 20 litres par kW, calculé pour la puissance calorifique minimum développée par celle-ci. Cependant, en fonction du modèle de la PAC (durée des cycles courts, capacité de régulation, puissance et nature des composants internes, nature du fluide), ce volume peut varier ; on se tournera alors vers le constructeur pour obtenir les informations les plus précises le concernant.

3 Production de chaud (chauffage)

Dans une utilisation en mode chauffage, la température de départ du réseau de distribution requise par le bâtiment varie généralement de 30 °C à 50 °C en fonction de la loi d'eau. Le condenseur de la pompe à chaleur alimente le bâtiment, la température en sortie de condenseur correspond à celle demandée par le bâtiment, l'écart entre l'entrée et la sortie du condenseur (et donc entre la sortie et l'entrée du circuit vers le bâtiment) étant généralement de l'ordre de 5 °C. Plus la température de consigne est basse, meilleure est la performance de la PAC.

L'évaporateur est relié aux forages à travers un échangeur. Le régime de température à l'évaporateur est variable dans le temps. Il dépend de l'état courant de la ressource géothermique. La connaissance de la variation du régime de température dans l'aquifère, ainsi qu'à l'évaporateur, permet alors d'adapter le débit d'eau pompée dans l'aquifère et de minimiser la consommation des pompes de forage (donc d'améliorer le COP).

4 Production d'eau chaude sanitaire

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) à partir de la PAC présente l'inconvénient de devoir porter l'eau à une température élevée (pendant 1 heure, à 65 °C pour éviter les risques de développement de la *Legionella*, la distribution ne devant pas excéder 55 °C).

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 la température susceptible d'être fournie par la PAC, il est 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.

Système intégrant les fonctions eau chaude et chauffage :

- PAC avec deux compresseurs dont un séparé pour l'eau chaude ;
- PAC avec désurchauffeur sur le circuit condenseur ;
- PAC à haute température dédiée à la production d'eau chaude ;
- système mixte de production avec appoint sur chaudière.

Le désurchauffeur extrait de la chaleur du fluide frigorigène chaud (dans sa phase vapeur) qui quitte le compresseur.

La chaleur (haute température) de la désurchauffe est récupérée pour chauffer l'eau du ballon d'ECS. Celle-ci n'a lieu que lorsqu'il y a une demande de chauffage ou de rafraîchissement pour les systèmes réversibles. Il y a toujours un surplus de chaleur lorsque l'appareil fonctionne en mode refroidissement et par temps doux en mode chauffage.

On peut également trouver des pompes à chaleur à plusieurs condenseurs.

5 Rafraîchissement par geocooling

On désigne sous le terme de geocooling, l'utilisation « directe » de la température du sous-sol (avec interposition d'un échangeur) **sans utilisation de la pompe à chaleur**, pour assurer le rafraîchissement.

Lorsque les locaux nécessitent un rafraîchissement notamment en été, les solutions à base de plancher, plafond, poutre ventilée, voire de ventilo-convecteur* (avec batterie sur dimensionnée) permettent de faire du geocooling.

Le rafraîchissement ainsi produit ne consomme que très peu d'énergie, à savoir uniquement celle des pompes de circulation. La majorité des besoins des bâtiments peut être traitée par cette technique peu énergivore.

L'utilisation du geocooling nécessite donc que la température du sous-sol soit inférieure à la température de production requise par le bâtiment. Ainsi par exemple, pour un sous-sol à 10 °C, un bâtiment fonctionnant sur un régime de rafraîchissement de 12 °C/7 °C ne peut pas fonctionner en geocooling, alors qu'un bâtiment fonctionnant sur un régime de 18 °C/13 °C le peut.

La température de la nappe variant en fonction de l'utilisation (alternance saisonnière des modes chauffage et rafraîchissement), il n'est pas rare de voir des installations pour lesquelles le geocooling assure une partie seulement des besoins, généralement aux intersaisons. Les appels de puissance froide, par exemple au milieu de l'été, sont alors relayés par la pompe à chaleur en mode réversible lorsque le geocooling n'est plus suffisant : le froid est produit par un système couplé PAC/geocooling.

Ce mode de fonctionnement en geocooling permet de mettre hors gel des locaux sans utilisation de la pompe à chaleur.

L'intérêt majeur d'un tel système est d'utiliser au maximum l'énergie du sol, sans pertes dues au fonctionnement des éléments de la pompe à chaleur.

Lorsque cette solution est couplée à l'emploi d'un groupe frigorifique, la priorité est donnée au rafraîchissement direct ; la production de froid n'est sollicitée qu'en cas d'insuffisance ou de besoin exceptionnel.

6 Production de froid

Dans les cas où les besoins en froid sont importants (bloc opératoire, salle informatique), il peut être nécessaire de produire le froid par la PAC.

Une pompe à chaleur réversible assure, en fonction des besoins, la production de chaleur et la production de froid. Pour cela, il convient d'inverser le cycle du fluide frigorigène en installant sur le circuit frigorifique une vanne d'inversion de cycle (4 voies). Le condenseur devient ainsi évaporateur et l'évaporateur devient condenseur. Il est alors possible de prélever de la chaleur dans les locaux à rafraîchir pour la rejeter dans le milieu extérieur par le biais de l'échangeur. 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. Le régime de température à l'évaporateur est imposé par les besoins du bâtiment (par exemple, 12 °C/7 °C), le régime au condenseur est tributaire de l'état des forages d'eau d'une part et des contraintes spécifiques à la pompe à chaleur d'autre part (température minimum de condensation...).

7 Production de chaud et de froid (thermofrigopompe)

Une production simultanée de chaud et de froid est possible, c'est le fonctionnement en « thermo-frigopompe ». 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...) pour un fonctionnement simultané en chauffage pour une partie du bâtiment et en refroidissement pour l'autre partie. On parle de système « 4 tubes ». L'énergie excédentaire (énergie chaude ou froide non utilisée pour les besoins du bâtiment) est alors évacuée à l'extérieur (forages d'eau). En fonction des besoins à satisfaire, cinq schémas de fonctionnement peuvent être envisagés (les parties du système non utilisées dans chacun des cas de fonctionnement sont en pointillés noirs).

Schéma chaud seulement.

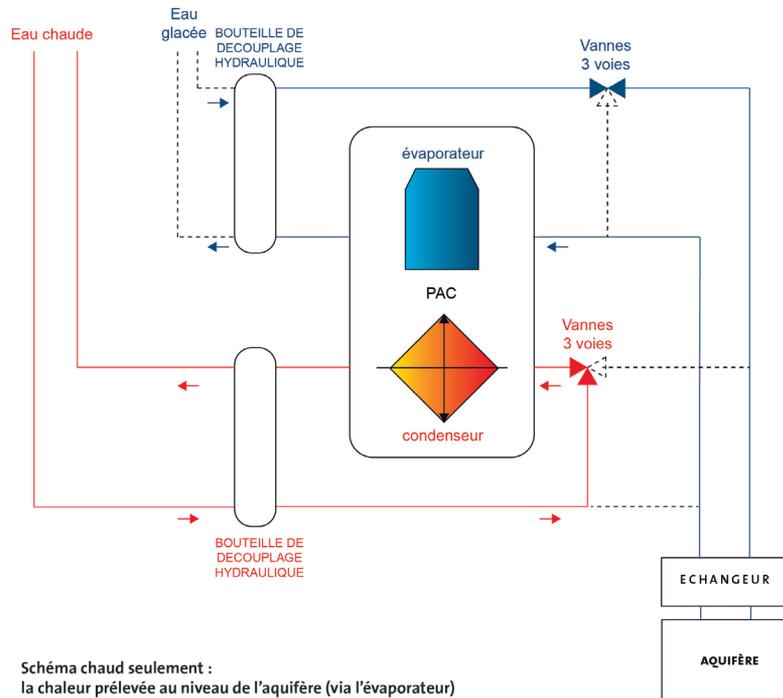


Schéma chaud et froid avec rejet froid sur le forage (besoin chaud supérieur au froid).

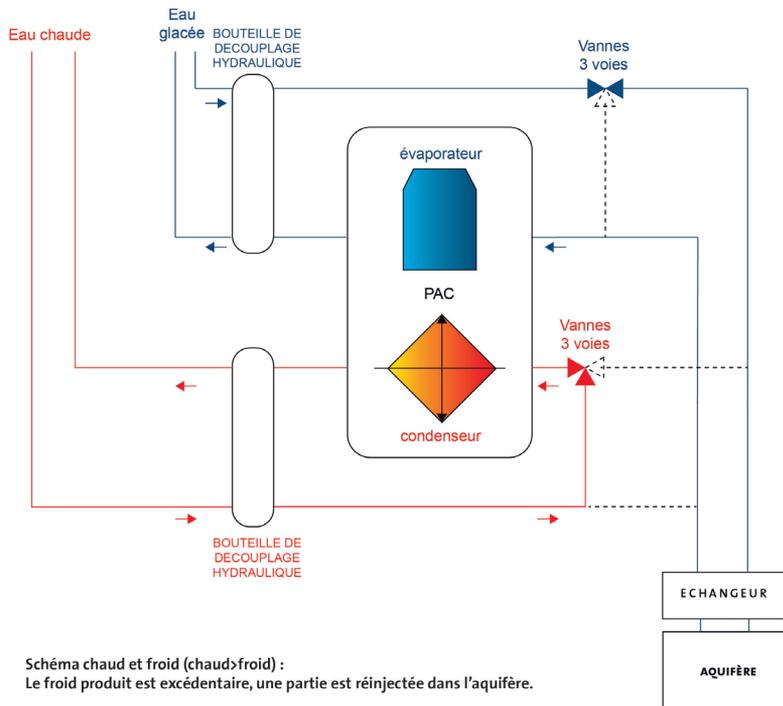


Schéma chaud et froid sans rejet (chaud = froid).

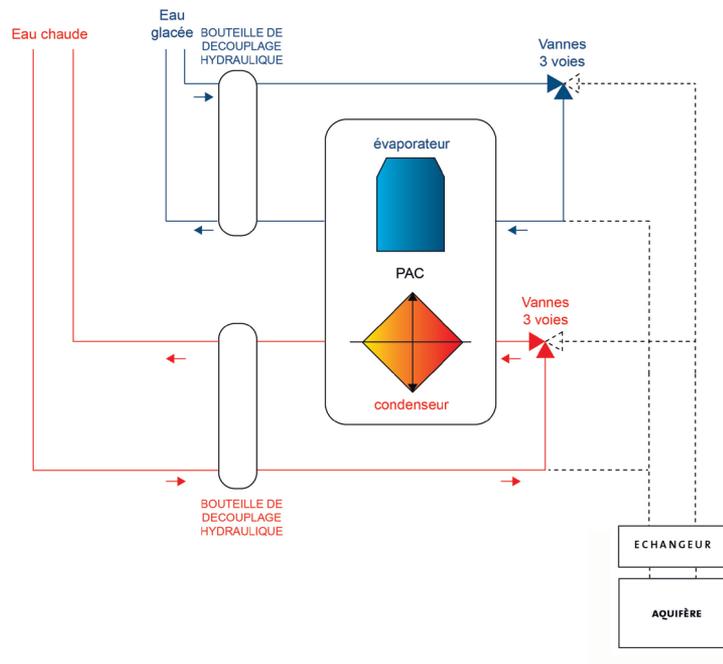


Schéma chaud et froid sans rejet (chaud=froid) :
L'équilibre entre chaud et froid étant réalisé, le doublet de forages n'est pas utilisé.

Schéma chaud et froid avec rejet chaud sur le forage (besoin froid supérieur au chaud).

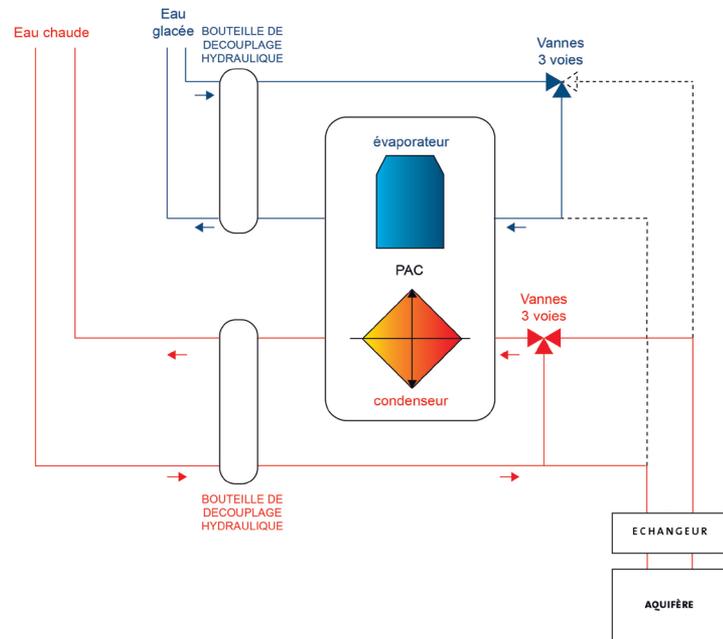


Schéma chaud et froid avec rejet chaud sur le forage (froid>chaud):
l'excédent de chaud est réinjecté dans l'aquifère.

Schéma froid seulement.

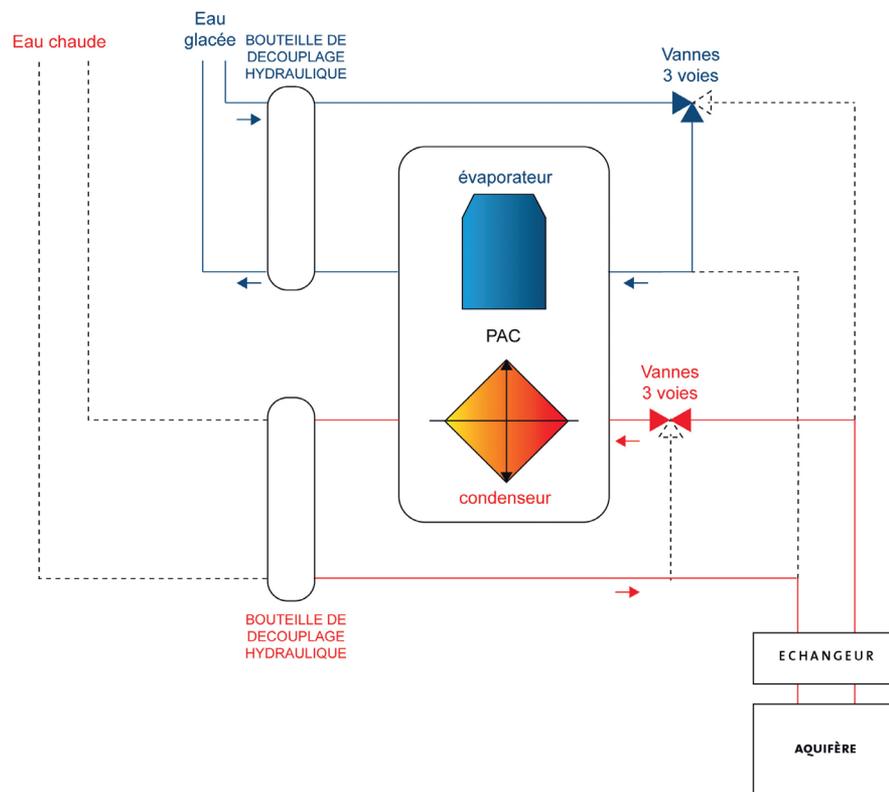


Schéma froid seulement :
la chaleur évacuée des locaux est transférée à l'aquifère
via le condenseur.

Détermination et optimisation des besoins

La détermination des puissances nécessaires pour assurer les besoins en chaud et en froid d'un bâtiment implique la prise en compte de nombreux paramètres.

La première démarche, que ce soit pour une construction neuve ou un bâtiment à rénover, est de mettre en œuvre quelques principes simples permettant de limiter les besoins thermiques. Parmi ceux-ci on peut citer par exemple : prendre en compte 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 une maîtrise d'œuvre (architecte, bureau d'études) engagée dans une démarche de qualité environnementale du bâti, par exemple HQE (www.assohqe.org). Les éventuels surcoûts occasionnés par la mise en place de certaines mesures sont rapidement compensés par les économies engendrées et un moindre impact environnemental.

La nouvelle réglementation RT 2012 a pour objectif de réduire la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs en moyenne à $50\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHONRT}\cdot\text{an}^7$.

Tout bâtiment neuf doit respecter les exigences de l'**arrêté du 26 octobre 2010** relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux. Elle s'applique aux bâtiments à usage de bureaux, enseignements, établissement d'accueil de la petite enfance et aux bâtiments à usage d'habitation à partir :

- du 28 octobre 2011 pour les bâtiments neufs à usage de bureaux ou d'enseignement, les établissements d'accueil de la petite enfance et les bâtiments à usage d'habitation construits en zone ANRU ;
- du 1^{er} janvier 2013 pour les autres bâtiments à usage d'habitation.

Par rapport à la RT 2005, cette nouvelle réglementation impose notamment :

- la mise en place de solutions permettant de limiter les besoins d'énergie pour le chauffage, le froid et l'éclairage par l'utilisation d'une nouvelle exigence caractérisée par le coefficient Bbio ;
- des caractéristiques thermiques minimales à respecter pour les ponts thermiques ;
- des performances en termes de consommations énergétiques évaluées à partir de valeurs absolues et non plus en comparaison avec une référence comme dans la RT 2005.

1 Détermination des besoins

L'évaluation des besoins thermiques d'un bâtiment dépend :

- de ses caractéristiques constructives : isolation, constitution des parois, choix des vitrages, étanchéité à l'air, orientation du bâtiment ;
- du choix des systèmes de chauffage-ventilation-conditionnement d'air (CVC) : débit de renouvellement d'air, températures de consigne des différentes zones thermiques ;
- des conditions climatiques du lieu considéré et des apports de chaleur internes.

Les besoins de chaud d'un bâtiment correspondent à la différence entre les apports internes (occupation, éclairage, équipements...) et externes (solaires) et les déperditions statiques et volumiques pour le chauffage, ainsi qu'aux besoins d'eau chaude sanitaire (ECS).

7 – La SHON d'une construction est égale à la surface hors œuvre brute de cette construction après déduction :

a) Des surfaces de plancher hors œuvre des combles et des sous-sols non aménageables pour l'habitation ou pour des activités à caractère professionnel, artisanal, industriel ou commercial.

b) Des surfaces de plancher hors œuvre des toitures-terrasses, des balcons, des loggias, ainsi que des surfaces non closes situées au rez-de-chaussée.

c) Des surfaces de plancher hors œuvre des bâtiments ou des parties de bâtiments aménagés en vue du stationnement des véhicules.

d) Des surfaces de plancher hors œuvre des bâtiments affectés au logement des récoltes, des animaux ou du matériel agricole ainsi que des surfaces des serres de production.

1.1 Eau chaude sanitaire

Les besoins en eau chaude sanitaire sont calculés en fonction du type d'usage du bâtiment. La quantité de chaleur nécessaire pour préparer l'eau chaude est :

$$Q = 1,163 \times \text{débit d'eau chaude} \times (T_{\text{ch}} - T_{\text{fr}}) \text{ en W.}$$

T_{ch} est la température de l'eau chaude mitigée utilisée au puisage.

T_{fr} est la température de l'eau froide entrant dans le système de préparation d'eau chaude.

Le débit d'eau chaude nécessaire dépend du type de bâtiment et de son usage ainsi que du nombre d'occupants.

Besoins en eau chaude sanitaire par usage type (calculs pratiques de plomberie sanitaires. G. Dubreuil, A. Giraud Éditions Parisiennes, 2008).

	Usage	Facteur dimensionnant
Hôtel	70–160 l	Par chambre
Restaurant	8–15 l	Par couvert
Hôpital, EHPAD	60 l/jour	Par lit
École, bureaux	5 l/jour	Par élève, personnel

1.2 Chauffage – déperditions statiques

Le calcul du coefficient U_{bat} ⁸ exprimé en $W/(m^2.K)$, coefficient moyen de déperdition par transmission à travers les parois déperditives séparant le volume chauffé du bâtiment, de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés (intégrant les ponts thermiques), sert à calculer les besoins de chaud en utilisant la formule :

$$\text{Déperditions statiques} = U_{\text{bat}} \times \text{somme des surfaces déperditives} \times (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \text{ en W}$$

La réglementation thermique limite la valeur de U_{bat} qui doit être inférieure à $U_{\text{bat ref}}$ calculé avec des valeurs de U de référence. De plus, elle introduit des valeurs garde-fou pour chaque paroi du bâtiment.

1.3 Chauffage – déperditions volumiques

$$\text{Déperditions volumiques} = \text{débits d'air neuf du bâtiment (m}^3/\text{h)} \times 0,34 \times (1 - \text{rendement de la récupération}) \times (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \text{ en W}$$

L'optimisation énergétique pour les besoins de chaud se fait dans un premier temps dès la conception, en limitant les déperditions par les parois puis, dans un deuxième temps, en augmentant les performances des systèmes thermiques. La mise en œuvre d'un système de récupération efficace sur l'air extrait et la limitation du débit d'air neuf aux besoins hygiéniques aura un impact direct sur l'énergie consommée.

⁸ – Voir arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux.

1.4 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. Un calcul succinct des charges de froid pour une première estimation peut être fait de la façon suivante :

Charges de froid = apports solaires + charges volumiques + charges internes

Apports solaires = flux solaires sur l'orientation x surface vitrée x g EN140 (facteur solaire du vitrage + stores) pour chaque orientation

Apports statiques = U_{bat} x surfaces totales déperditives x $(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$ en W

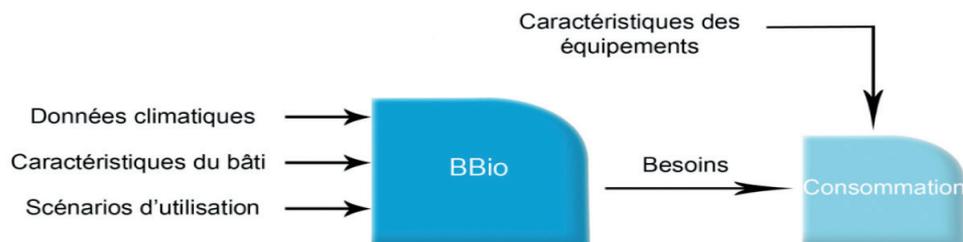
Charges internes = charges dues aux occupants + charges dues aux équipements de bureautique + charges dues à l'éclairage.

L'optimisation énergétique est obtenue en limitant l'apport solaire par l'usage de casquettes, de stores externes, ou de vitrages performants et en augmentant le rendement de l'intensité d'éclairage (W/100 Lux).

2 Exigences de la RT 2012

2.1 Coefficient Bbio

Afin de réduire les besoins énergétiques des bâtiments, la RT 2005 fixait des valeurs minimales à respecter en termes d'isolation des parois (coefficients U et Ψ), s'attachant ainsi principalement aux besoins de chauffage. Dans la RT 2012, ces valeurs minimales sont remplacées par une nouvelle exigence portant sur l'efficacité énergétique du bâti, caractérisée par le coefficient Bbio. Il correspond au besoin bioclimatique conventionnel d'énergie pour le chauffage, le froid, et l'éclairage et doit « qualifier la qualité énergétique du bâti avant de savoir quels seront les systèmes qui l'équiperont ».



Il est sans dimension, en nombre de points et ne peut être calculé qu'à partir de la méthode Th-BCE RT 2012. Son expression est la suivante :

$$\mathbf{Bbio} = 2 \mathbf{B}_{CH} + 2 \mathbf{B}_{FR} + 5 \mathbf{B}_{ECL}$$

Ce calcul prend en compte :

- une ventilation double flux avec un échangeur d'efficacité 50 % ;
- une puissance installée d'éclairage dépendante de la typologie d'usage et des interrupteurs marche/arrêt gérés manuellement selon la lumière du jour.

Afin de répondre aux exigences de la RT 2012, le coefficient Bbio du bâtiment doit être inférieur à son coefficient Bbiomax, défini comme suit :

$$\mathbf{Bbio}_{\max} = \mathbf{Bbio}_{\max\text{moyen}} \times (\mathbf{Mbgéo} + \mathbf{Mbalt} + \mathbf{Mbsurf})$$

Avec :

- $\mathbf{Bbio}_{\max\text{moyen}}$: valeur moyenne du Bbiomax définie par type d'occupation du bâtiment ou de la partie de bâtiment et par catégorie CE1/CE2 ;
- $\mathbf{Mbgéo}$: coefficient de modulation selon la localisation géographique ;
- \mathbf{Mbalt} : coefficient de modulation selon l'altitude ;
- \mathbf{Mbsurf} : pour les maisons individuelles ou accolées, coefficient de modulation selon la surface moyenne des logements du bâtiment ou de la partie de bâtiment.

Avec la RT 2005, il était possible de concevoir des bâtiments dont la performance énergétique de l'enveloppe était limitée et compensée par des systèmes de production d'énergie performants type pompe à chaleur géothermique, permettant ainsi d'atteindre des niveaux de consommations performants, éligibles à des labels énergétiques.

La RT 2012 impose désormais des exigences sur l'enveloppe par une approche bioclimatique afin de réduire les besoins à satisfaire par les systèmes de production.

2.2 Caractéristiques thermiques minimales – ponts thermiques

Deux exigences sont à respecter pour les ponts thermiques :

- le ratio de transmission thermique linéique moyen global ne doit pas dépasser la valeur suivante :

$$\mathbf{Ratio}_{\psi} \leq 0,28 \mathbf{W}/(\mathbf{m}^2\mathbf{SHON}_{RT}\mathbf{K})$$

- le ratio de transmission thermique linéique moyen des liaisons entre plancher intermédiaire et mur ne doit pas dépasser :

$$\mathbf{\Psi}_g \leq 0,60 \mathbf{W}/\mathbf{m.K}$$

Cette seconde exigence implique de traiter les cas en isolation par l'intérieur, ainsi que les balcons lorsque ceux-ci sont non négligeables.

2.3 Limitations des consommations énergétiques

Comme pour la RT 2005, la RT 2012 limite les consommations conventionnelles d'énergie primaire définies par le coefficient Cep.

Ce coefficient tient compte de la consommation de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de ventilation et d'auxiliaires. Il est exprimé en kWhEP/m²_{SHONRT.an}⁹.

En RT 2005, le Cep devait être inférieur au Cep_{ref} (consommations conventionnelles du bâtiment de référence). Désormais le Cep doit être inférieur au Cep_{max} défini comme suit :

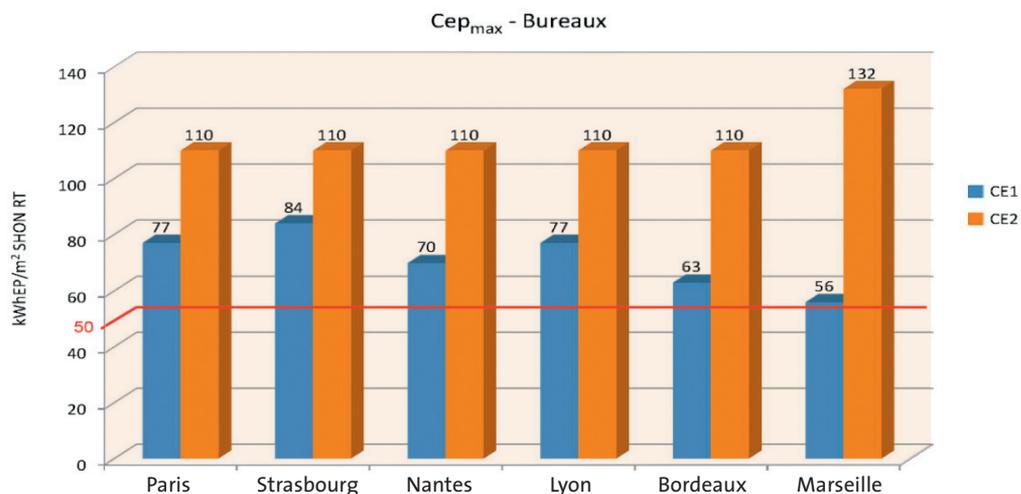
$$\text{Cep}_{\text{max}} = 50 \times \text{Mctype} \times (\text{Mcgeo} + \text{Mcalt} + \text{Mcsurf} + \text{McGES}) \text{ (usage autre qu'habitation)}$$

$$\text{Cep}_{\text{max}} = 57.5 \times \text{Mctype} \times (\text{Mcgeo} + \text{Mcalt} + \text{Mcsurf} + \text{McGES}) \text{ (usage d'habitation)}$$

Le Cep_{ref} fluctuait en fonction du projet, le Cep_{max} est une valeur fixe modulée par plusieurs paramètres :

- **Mctype** : coefficient de modulation selon le type de bâtiment ou de partie de bâtiment et sa catégorie CE1/CE2.
- **Mcgeo** : coefficient de modulation selon la localisation géographique.
- **Mcalt** : coefficient de modulation selon l'altitude.
- **Mcsurf** : pour les maisons individuelles ou accolées et les bâtiments collectifs d'habitation, coefficient de modulation selon la surface moyenne des logements du bâtiment ou de la partie de bâtiment (Mcsurf = 0 en bureaux).
- **McGES** : coefficient de modulation selon les émissions de gaz à effet de serre (si réseau de chaleur/froid ou bois en habitation).

Le graphique suivant donne des exemples de Cep_{max} pour un bâtiment de bureaux pour une altitude standard et non raccordé à des réseaux de chaud ou froid.



⁹ – L'énergie primaire est l'énergie définie à la source, disponible sur terre. Cette énergie est nécessaire pour produire l'énergie finale, celle qui est utilisée par le bâtiment.

Ces valeurs sont à moduler en fonction des parts de surface en catégorie CE1/CE2. Les locaux de type CE1 ont des consommations conventionnelles maximales de froid nulles. La catégorie est définie en fonction de la zone climatique, de la zone de bruit et de la typologie d'usage.

La plupart du temps les bureaux sont en catégories CE2. Ainsi, en région parisienne, le Cep_{max} d'un bâtiment de bureaux sera d'environ $100 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHONRT}$ soit deux fois l'objectif.

Les labels de performance énergétique avec la RT 2012 ne sont pas encore connus.

Les labels énergétiques basés sur la RT 2005 sont les suivants :

Labels	Objectifs énergétiques
HPE (haute performance énergétique)	$Cep - 10 \%$
HPE EnR (énergies renouvelables)	$Cep - 10 \%$ + utilisation EnR
THPE (très haute performance énergétique)	$Cep - 20 \%$
THPE EnR (énergies renouvelables)	$Cep - 30 \%$ + utilisation EnR
BBC (bâtiment basse consommation)	$Cep - 50 \%$ (en non résidentiel)
	$Cep \leq 50 \times (a + b) \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHON.an}$ (en résidentiel) <i>a</i> et <i>b</i> : définis selon la zone climatique et l'altitude

3 Réglementation thermique des bâtiments existants

Pour les bâtiments existants construits après 1948, d'une surface supérieure à $1\,000 \text{ m}^2$, et dont les coûts des travaux de rénovation thermique dépassent les 25 % des coûts de la construction, la RT générale sera appliquée. Pour les autres cas la réglementation s'applique à l'élément rénové seulement.

4 Préconisations visant à limiter les besoins

4.1 Réduire les besoins de chauffage

Isolation

Afin de réduire les déperditions, il est nécessaire d'isoler les parois et de réduire les ponts thermiques. Le tableau suivant donne des niveaux d'isolation recommandés.

	Description de l'isolation ¹⁰	U
Murs extérieurs	200 mm de laine de roche extérieure	$0,20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Toitures terrasses	120 mm de polyuréthane	$0,20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Fenêtres et parois vitrées	Double vitrage faiblement émissif, remplissage 16 mm argon Menuiseries bois ou PVC	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ $U_w = 1,8$

¹⁰ – Les isolants sont donnés à titre d'exemple par rapport à leurs caractéristiques thermiques. D'autres possibilités pourront être envisagées dans le cadre de la limitation des impacts environnementaux et sanitaires des matériaux employés.

Le traitement des ponts thermiques doit être assuré par une isolation extérieure ou par des rupteurs de ponts thermiques.

Pour les murs et le traitement des ponts thermiques, l'isolation peut également être répartie :

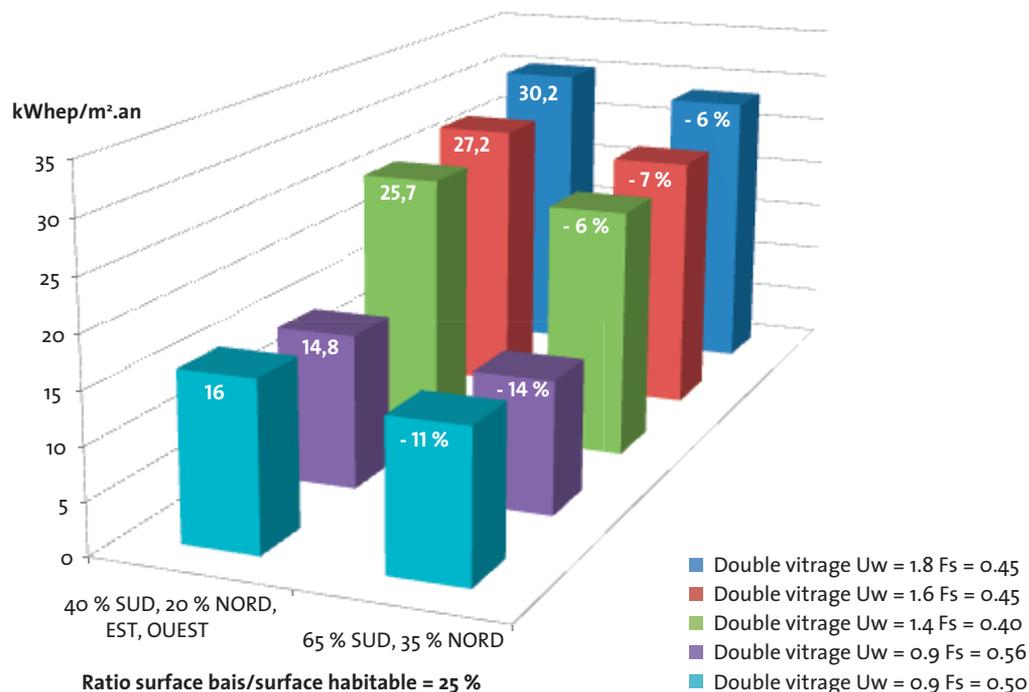
- isolation extérieure/béton/isolation intérieure ;
- maçonnerie isolante (brique monomur/béton cellulaire) + isolation intérieure.

Lorsque des balcons sont envisagés, notamment en logement, il est préférable d'avoir des structures entièrement désolidarisées ou des rupteurs de ponts thermiques.

Les nouvelles exigences de la RT 2012 impose une attention particulière pour le traitement des ponts thermiques.

Valorisation des apports solaires

En optimisant l'enveloppe du bâtiment et en favorisant des surfaces vitrées orientées sud-est à sud-ouest, des réductions de besoins de chauffages sont envisageables. Le graphique ci-dessous donne l'impact de la répartition des surfaces vitrées par orientation sur les consommations de chauffage d'un bâtiment de logement.

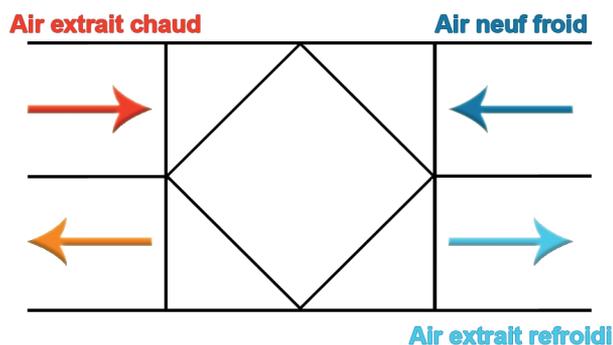


Cette préconisation doit s'accompagner de dispositif de protection solaire performant pour l'été.

Récupération d'énergie sur l'air extrait

Les centrales de traitement d'air double flux doivent être équipées d'échangeurs rotatifs ou d'échangeurs à plaques à haut rendement pour assurer la ventilation hygiénique du bâtiment. Ces échangeurs possèdent une efficacité de 70 % à 80 % ce qui permet de prétraiter l'air neuf de façon gratuite et ainsi de minimiser de façon importante les consommations énergétiques liées aux déperditions volumiques.

Échanges entre l'air extrait et l'air neuf dans une CTA double flux.



Les débits hygiéniques retenus ne devront pas être excessifs afin de ne pas avoir des consommations électriques des ventilateurs trop importantes, et afin de minimiser les consommations de chauffage. Les débits devront cependant respecter des valeurs minimales afin d'obtenir une qualité d'air satisfaisante.

Le code du travail impose un débit minimum de 25 m³/h/pers.

On considère qu'une valeur située entre 25 et 45 m³/h/pers offre un bon compromis qualité d'air/consommations énergétiques. Afin de valider le niveau « Performant » du référentiel HQE pour la qualité d'air, il est nécessaire de prévoir un débit de 36 m³/h/pers.

Une grande partie des besoins de chauffage provient des relances, mises en températures, qui s'effectuent avant l'occupation. Pour des raisons de qualité d'air, la ventilation hygiénique doit être redémarrée avant l'utilisation et donc pendant les périodes de relance. Cela contribue à augmenter les consommations de chauffage.

Un compromis sur l'heure de redémarrage doit être trouvé de façon à satisfaire aux exigences de qualité de l'air tout en minimisant les consommations de chauffage.

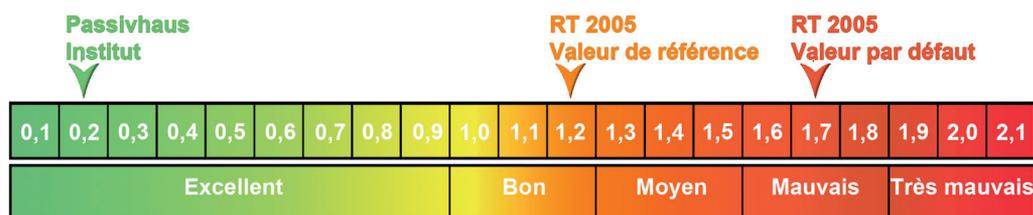
Étanchéité à l'air

Les défauts d'étanchéité des bâtiments sont la source de flux d'air non contrôlés susceptibles d'augmenter les besoins de chauffage de façon très importante. Ces fuites sont localisées en quatre catégories :

- liaisons façades et planchers (liaisons mur/dalle sur terre-plein, liaison mur/dalle ou plancher en partie courante...);
- menuiseries extérieures (seuil de porte, seuil de porte-fenêtre, liaison mur/fenêtre au niveau du linteau...);
- équipements électriques (interrupteurs sur paroi extérieure, prises de courant sur paroi extérieure...);
- trappes et éléments traversant les parois (trappes d'accès aux combles, trappe d'accès aux gaines techniques...).

La réglementation thermique quantifie ces infiltrations par le facteur l_{411} , correspondant au débit d'air infiltré par m^2 d'enveloppe à l'air ($m^3/h/m^2$). L'échelle suivante permet d'établir les performances associées.

Échelle d'appréciation de la perméabilité à l'air d'un bâtiment.



Les besoins de chauffage augmentent rapidement avec la perméabilité à l'air.

La perméabilité à l'air doit faire l'objet d'une attention particulière dès la phase conception (carnet de détails) et d'une sensibilisation dans la phase réalisation. Les points suivants peuvent être mentionnés :

- assurer l'étanchéité à l'air lors de la mise en œuvre des équipements, notamment en traversée de dalle, de façade et de toiture ;
- assurer une parfaite étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment ;
- fournir et poser les éléments nécessaires à l'atteinte de cet objectif d'étanchéité à l'air (joints spécifiques, colles, boîtiers étanches...) ;
- garantir une continuité de mise en œuvre des isolants et des pare-vapeurs en cas de traversée ;
- soigner les réservations.

Limiter les apports d'éclairage

La première étape consiste à réduire au maximum la puissance installée.

Une valeur de $1,6 W/m^2/100 lux$ correspond à un objectif atteignable permettant de maintenir des bonnes conditions (éclairage suffisant et un niveau d'uniformité satisfaisant).

La seconde étape est l'**optimisation du recours à la lumière naturelle plus agréable et gratuite**. La lumière naturelle la plus efficace est celle provenant du nord car plus stable.

Une fois ces deux critères respectés, il est essentiel de les coupler à une gestion optimale du système d'éclairage. Pour cela différents équipements sont envisageables :

- détecteurs de présences : lorsque le poste de travail est inoccupé depuis un certain temps, l'éclairage s'arrête ;
- sondes de luminosité couplées à des ballasts électroniques gradables : la sonde permet de mesurer l'éclairage naturel reçu. L'éclairage artificiel est alors ajusté au strict nécessaire pour atteindre le niveau d'éclairage minimum ;
- gestion centralisée : une programmation horaire par zone est effectuée par l'intermédiaire de la GTB permettant l'extinction de l'ensemble des luminaires de la zone.

¹¹ – Débit de fuite à 4 Pa normalisé par la surface des parois froides, hors plancher bas (en $m^3/h/m^2$).

Limiter les apports des équipements

Il s'agit principalement des équipements de bureautique. Comme pour l'éclairage, la première étape consiste à limiter la puissance installée. Cela nécessite l'utilisation d'appareils performants. Le tableau suivant donne les puissances pour différents types de postes de travail.

Poste	Puissance
PC fixe + écran cathodique	160 W
PC fixe + écran LCD	100 W
PC portable + écran LCD	60 W
PC portable	35 W
Client léger + écran LCD	40 W

La gestion des fonctionnements « Marche » et « Veille » des appareils doit être configurée de façon à ce que l'appareil soit en veille dès que l'utilisateur quitte son poste. La gestion énergétique des appareils est assurée à l'aide d'outils intégrés tel qu'EnergyStar dont les paramètres sont réglables par l'utilisateur.

Les appareils annexes (imprimantes, photocopieurs, fax...) doivent être rassemblés dans certains points fermés par rapport aux zones de travail.

La réduction des consommations de ce poste est complètement liée à l'utilisation qui est en faite par l'utilisateur et de l'implication des preneurs dans le choix des équipements informatiques.

Limiter les apports solaires

Les différentes mesures à adopter pour réduire ces apports sont les suivantes :

- éviter les surfaces vitrées orientées de l'azimut SSO à l'azimut NO ;
- utiliser des vitrages à contrôle solaire (le facteur solaire du vitrage devra être inférieur à 0,45) ;
- utiliser des protections solaires extérieures mobiles orientables et inclinables afin de l'utiliser comme régulateur d'éclairage naturel. Les protections solaires seront étudiées spécifiquement pour chaque façade.

Inertie et ventilation nocturne

Une fois les apports internes et solaires réduits, le couplage de deux autres paramètres permet de réduire les consommations de froid :

- l'inertie ;
- la ventilation nocturne.

La masse thermique (l'inertie) permet d'absorber une partie des apports en journée. La ventilation nocturne permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par l'inertie, elle est d'autant plus efficace que le débit est important et que la température est basse. Ainsi, les montées en température (ou les besoins de froid) de la journée suivante seront limitées malgré des variations importantes des conditions extérieures et des apports internes.

La seule inertie permet d'éviter les pics mais si elle n'est pas associée à une ventilation nocturne, la décharge n'est pas efficace voir inexistante et l'inertie n'est pas valorisée.

• Inertie

Afin de profiter pleinement de l'inertie, il faut que cette masse thermique soit au contact de l'air intérieur et que son « développé de surface » soit le plus important possible. Pour cela, plusieurs possibilités sont envisageables :

- utilisation de faux-plafond partiels, ou fractionnés, ou suspendus afin que le plafond lourd soit accessible à la circulation d'air ;
- isolation par l'extérieur et parois lourdes ;
- utilisation de cloisons lourdes.

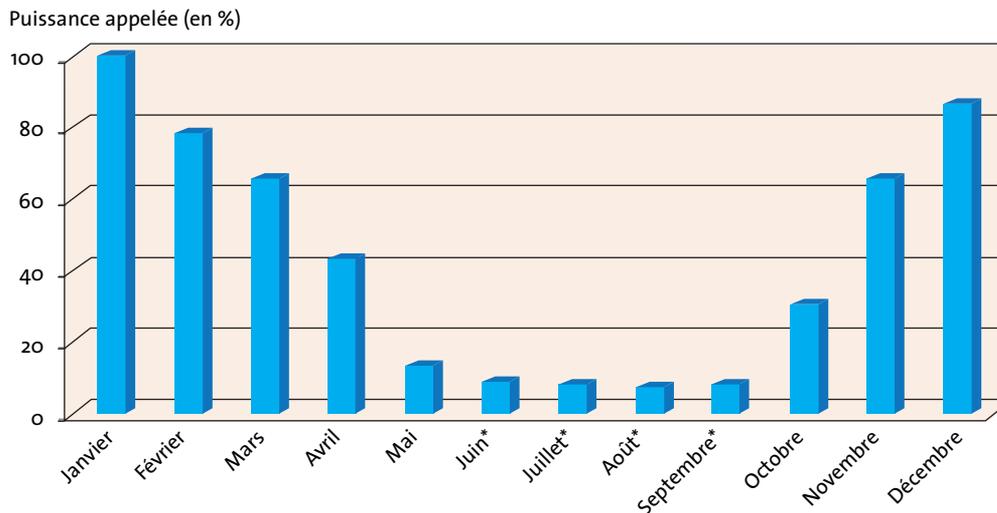
• Ventilation nocturne

Elle peut être réalisée de façon naturelle ou mécanique :

- **naturelle** : par ouverture des fenêtres. Cette solution a l'avantage de ne générer aucune consommation énergétique. Cependant elle peut parfois poser des problèmes de sécurité, de protection aux intempéries et de gestion du bâtiment ;
- **mécanique** : soufflage d'air extérieur en utilisant le système double flux. Cette solution génère des consommations électriques supplémentaires.

5 Taux de couverture suivant la ressource accessible

Courbe monotone de la puissance appelée sur une année.



* Besoins de froid¹².

¹² – L'ECS n'est pas représentée sur le graphique. La puissance est plus ou moins constante toute l'année.

5.1 Choix du taux de couverture

Le choix du taux de couverture modifie grandement l'investissement de départ. Il n'est donc parfois pas judicieux de couvrir la totalité des besoins avec la solution de pompe à chaleur géothermique pour que celle-ci soit retenue.

La décision de couvrir les puissances crête de chaud et/ou de froid ou d'installer une puissance maximale limitée mais couvrant un fort pourcentage des consommations ou la décision de dimensionner l'échangeur géothermique pour obtenir un maximum de « rafraîchissement direct » venant du sol dépendent de la ressource disponible, des résultats de l'analyse en coût global et de la démarche environnementale de l'investisseur. Une comparaison en coût global permet de prendre une décision finale. Elle prend en compte les coûts d'investissements : sondes ou forages, locaux techniques, impact des tranchées sur le génie civil. Elle prend aussi en compte les coûts énergétiques (consommations des équipements et auxiliaires) et les coûts de maintenance.

Les besoins réels au pas de temps horaire approximés par la simulation thermique dynamique doivent être pris en compte pour comparer l'impact d'un abaissement du taux de couverture sur les consommations.

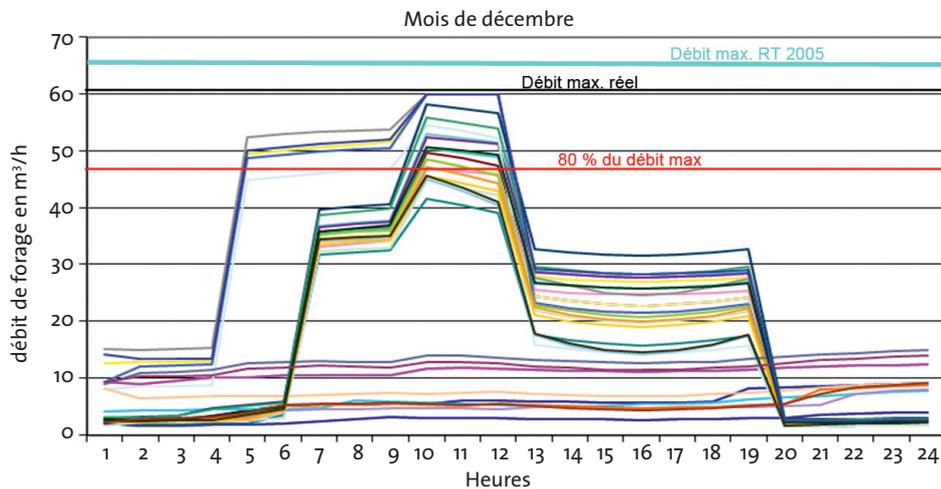
L'analyse du fonctionnement dynamique du bâtiment et des systèmes permet en effet de mettre en évidence les fluctuations d'appel de puissance et notamment le fait que les puissances maximales (donc les débits de pompage sur nappe et les linéaires de sondes) sont appelées une faible partie du temps de fonctionnement.

En cas d'insuffisance de la ressource pour satisfaire 100 % des besoins théoriques ou si la décision a été prise de ne pas satisfaire 100 % des besoins pour des raisons économiques, il peut donc être décidé d'adopter une solution géothermique avec un complément d'énergie (électrique ou à gaz notamment).

Dans les projets où les besoins du froid sont dominants, il peut être bénéfique de mettre en place un système géothermique couvrant la puissance de chauffage et de rejeter les calories en surplus grâce à un système de refroidissement additionnel. De même, dans les projets où les besoins du chaud sont dominants, il peut être bénéfique de mettre en place une chaudière pour injecter les calories additionnelles et dimensionner le circuit géothermique sur la puissance de climatisation*. L'ajout de ces équipements a néanmoins un impact sur la maintenance, l'investissement et la taille des locaux techniques qu'il faudra prendre en compte dans les calculs de retour sur investissement et l'étude de faisabilité.

5.2 Exemple de choix de taux de couverture (étude du projet du Collège des Bernardins)

Pour ce projet, les courbes ci-après illustrent les variations de débit nominal de forage pour chaque journée de décembre. Sur l'ensemble du mois, la durée pendant laquelle le débit requis dépasse 80 % du débit maximal est de l'ordre de 50 heures soit 7 % de la durée globale de fonctionnement. Dans cet exemple, il est donc plus intéressant d'installer un système géothermique dimensionné pour 80 % du débit maximal réel.



5.3 Réhabilitation

Dans le cas de projets d'extension ou de réhabilitation, le maintien éventuel d'un système de production existant (exemples : chaufferies, groupes de froid) doit être pris en compte dans la définition du système de production.

Le couplage de la solution pompe à chaleur avec les systèmes existants conservés peut permettre de se satisfaire d'une ressource (ressource en eau, débit et « puissance disponible » du forage d'eau) insuffisante pour satisfaire la totalité des besoins.

Si les besoins de chaud sont supérieurs aux besoins de froid, le système PAC pourra être dimensionné en fonction des besoins de froid, l'appoint chaud étant satisfait par le système existant conservé. Ceci permet de limiter les investissements du poste « Forages et équipements ».

Compte tenu des avantages en termes de performances énergétiques et environnementales, le recours au système pompe(s) à chaleur géothermique(s) doit être privilégié, le système réemployé servant d'appoint - secours.

Par ailleurs, pour certains projets, des exigences de fiabilité du fonctionnement des installations (salles de serveurs informatiques par exemple) peuvent nécessiter la mise en œuvre d'un système de secours (exemples groupes frigorifiques supplémentaires).

Dans cette configuration, la solution de secours peut constituer, sans investissement supplémentaire, l'appoint de la solution PAC géothermique.

Conception des installations de surface

1 Principes généraux

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

- la détermination des besoins en chaud et en froid : simulation thermique ou relevés électricité et gaz pour les bâtiments existants ;
- la détermination des niveaux de température requis par les émetteurs en chaud et en froid, qui devront être assurés par le système géothermique ;
- la réalisation d'une étude préliminaire permettant de faire un dimensionnement par ratios selon le type de sol et l'usage du bâtiment pour comparer les solutions géothermiques possibles avec des solutions plus conventionnelles. Ce premier calcul rapide du retour sur investissement et les résultats de l'étude de faisabilité permettent de prendre une décision concernant la viabilité et le choix du système géothermique à installer :
 - la réalisation d'une étude hydrogéologique : identification de la capacité géothermique du terrain et détermination des types de sources disponibles ;
 - le choix d'émetteurs basse température (planchers chauffants, poutres froides, ventilo-convecteurs...);
 - le choix du type de géothermie en circuit ouvert ou fermé ; définition des capteurs, du débit ou du linéaire de sonde ; choix du type de montage.

C'est de la qualité de la mise en adéquation de la ressource et des besoins que va dépendre l'efficacité énergétique et économique de l'opération.

Le déroulement d'une opération est présenté en annexe.

2 Choix des émetteurs

2.1 Émetteurs à eau (chaud et froid)

L'utilisation en chauffage d'un régime d'eau basse température a des conséquences non négligeables sur l'investissement, du fait de la sélection d'appareils terminaux de taille supérieure ou en plus grand nombre, et sur l'intégration des systèmes dans les locaux à traiter puisque à puissance égale, un émetteur dimensionné en régime basse température aura un encombrement nettement supérieur à un émetteur dimensionné en haute température.

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

Radiateurs à eau

En ce qui concerne les radiateurs associés à un chauffage par pompe à chaleur, la loi de régulation fixe 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. Le passage d'un régime d'eau standard de 80/60 °C à un régime d'eau de 50/40 °C implique une augmentation de la surface du radiateur de 150 %.

Planchers chauffants

Compte tenu de leur grande surface d'émission et donc de leurs niveaux de températures plus bas, les planchers chauffants sont bien adaptés à un chauffage par pompe à chaleur. Ils permettent aussi, moyennant certaines précautions (risques de condensation), de rafraîchir les locaux. C'est un système simple qui est bien adapté au régime basse température (16-19 °C). La puissance en froid d'un plancher est limitée : environ 35 W/m² de SHON.

Plafonds rayonnants hydrauliques

Par rapport aux planchers, les plafonds rayonnants hydrauliques ont des puissances de rafraîchissement nettement plus élevées : de 60 à 80 W/m². Il est à noter que ce type de système demande une coordination précise pour intégrer dans le plafond les luminaires, les diffuseurs et les autres systèmes tels que sprinklers et appareils de détection. La maintenance des éléments est minimale et le système est très peu bruyant.

Les planchers et plafonds rayonnants hydrauliques peuvent être constitués de tuyaux directement coulés dans la dalle de béton ou d'éléments métalliques localisés en sous plafond. Le transfert de chaleur se fait par rayonnement et convection. Un système coulé dans la masse du béton est moins réactif qu'un système au plafond.

Ces deux systèmes présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes aérauliques : meilleur confort, absence de courant d'air et de bruit, possibilité d'utilisation directe de l'énergie de l'échangeur géothermique pour le rafraîchissement ou le hors-gel (geocooling).

2.2 Émetteurs à air

Les systèmes aérauliques sont bien adaptés au chauffage des bâtiments ayant des émetteurs de chaleur inadaptés (haute température), des systèmes de refroidissement anciens ou des grands volumes. Ils permettent à la fois la ventilation, le filtrage de l'air et un renouvellement d'air précis et simple.

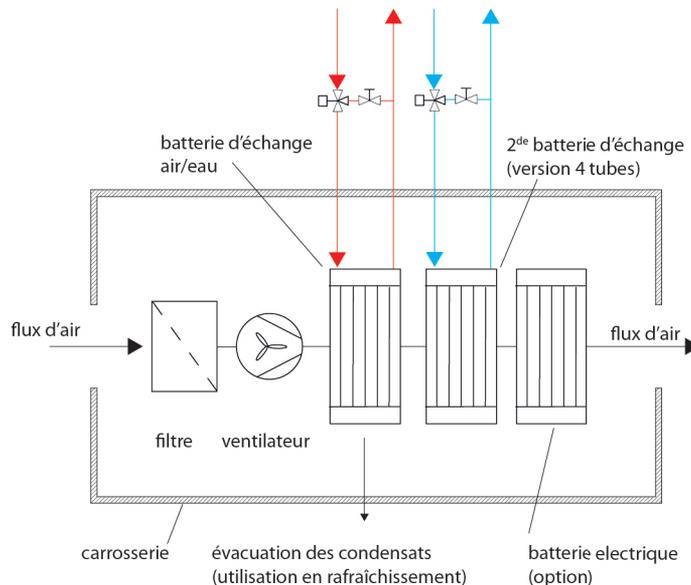
La conception et la mise en œuvre des systèmes aérauliques doivent être réalisées en portant une attention particulière pour éviter les inconvénients souvent attachés à ce genre de systèmes (courant d'air, niveau sonore élevé, sensation de trop chaud ou de trop froid...).

Les systèmes les plus couramment utilisés sont les ventilo-convecteurs 2 ou 4 tubes ou « 2 tubes - 2 fils ». Des techniques performantes arrivent 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 la batterie d'échange eau/air et par l'augmentation du débit avec une élévation de la puissance acoustique, et 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.

Ventilo-convecteurs



Différents types existent :

- ventilo-convecteur « 2 tubes » : l'appareil comporte une seule batterie d'échange eau/air et est raccordé à un réseau de distribution (chaud ou froid) ;
- ventilo-convecteur « 2 tubes - 2 fils » : l'appareil est équipé d'une batterie électrique ;
- ventilo-convecteur « 4 tubes » : l'appareil comporte 2 batteries d'échange eau/air (une batterie chaude et une batterie froide) raccordées à deux réseaux de distribution. Cette solution plus coûteuse en termes d'investissement permet une régulation indépendante des locaux.

Batteries froides et batteries chaudes de Centrale de traitement d'air (CTA)

L'utilisation de l'énergie géothermique pour la sélection des batteries des centrales de traitement d'air a une implication sur le nombre de rangs de celles-ci donc leur taille pour atteindre la puissance nécessaire à basse température.

Poutres froides actives

Comme les ventilo-convecteurs, les poutres froides actives intègrent la ventilation et le système chauffage/rafraîchissement. Il s'agit de longues batteries chaudes ou froides à travers lesquelles l'air est forcé. Le transfert de chaleur se fait par convection naturelle et forcée. La portion convective est plus importante que pour les plafonds rayonnants ce qui permet à la poutre de couvrir une charge plus importante.

Les poutres sont bien adaptées au fonctionnement en régime basse température (régime d'eau : 15/18 °C). Il est possible de faire une utilisation directe de la nappe pour le rafraîchissement (température de surface limitée à 18 °C du fait des risques de condensation).

La puissance en froid est limitée à environ 120 W/m² d'émetteur.

Il est à noter que le débit d'air nécessaire est plus élevé que pour un système de plafonds rayonnants et que la perte de charge sur le circuit aéraulique est plus importante donc le poste ventilation consommera plus.

Le système est peu bruyant. Une hauteur sous poutre minimum de 2,8 mètres est nécessaire pour le confort des occupants.

3 Distribution dans le bâtiment

Il existe deux modes de distribution dans le bâtiment : le mode centralisé où un seul local technique alimente l'ensemble du bâti, et le mode décentralisé où le bâti est divisé en unités possédant chacune son propre local privatif.

En mode centralisé, un seul doublet de forages produit les besoins pour l'ensemble du bâti. Le local technique contient les équipements de production ; il alimente le réseau d'émetteurs passifs.

En fonction de l'étendue et de l'utilisation du bâtiment, il peut être nécessaire de réaliser plusieurs locaux techniques disposant chacun de leur PAC pour alimenter une partie du bâtiment, qui est alors exploité par zones. La réalisation de plusieurs locaux techniques comprenant une pompe à chaleur par local permet en effet d'être proche de la charge à couvrir, avec un petit réseau de distribution.

Lorsque le bâtiment est très étendu ou que le découpage par zones est rendu nécessaire par des aspects financiers (privatisation de l'exploitation de chaque zone, par exemple magasins en galerie commerciale) ou de confort (par exemple, confort propre à chaque chambre d'un hôtel), le doublet de forages alimente un réseau sur lequel sont reliées autant de PAC de petite capacité que de zones à traiter.

Alternativement, il peut être envisagé de répartir les doublets de forages d'eau entre chacun des locaux techniques, qui intègrent alors l'ensemble des équipements nécessaires pour la circulation et la production. On perd le bénéfice de la mutualisation des équipements, mais ce mode de fonctionnement peut s'avérer nécessaire lorsque, par exemple, le bâti est destiné à être alloti (entrepôts à usage multiple, groupement résidentiel ou petits collectifs).

La décision de centraliser ou de décentraliser les locaux techniques est à valider d'un point de vue économique avec une étude de coût global.

Un système semi-centralisé avec une pompe de circulation à débit variable est généralement mis en œuvre pour servir plusieurs zones avec fermeture des circuits géothermiques et des PAC non utilisées (vanne d'isolement fermée quand le compresseur ne marche pas).

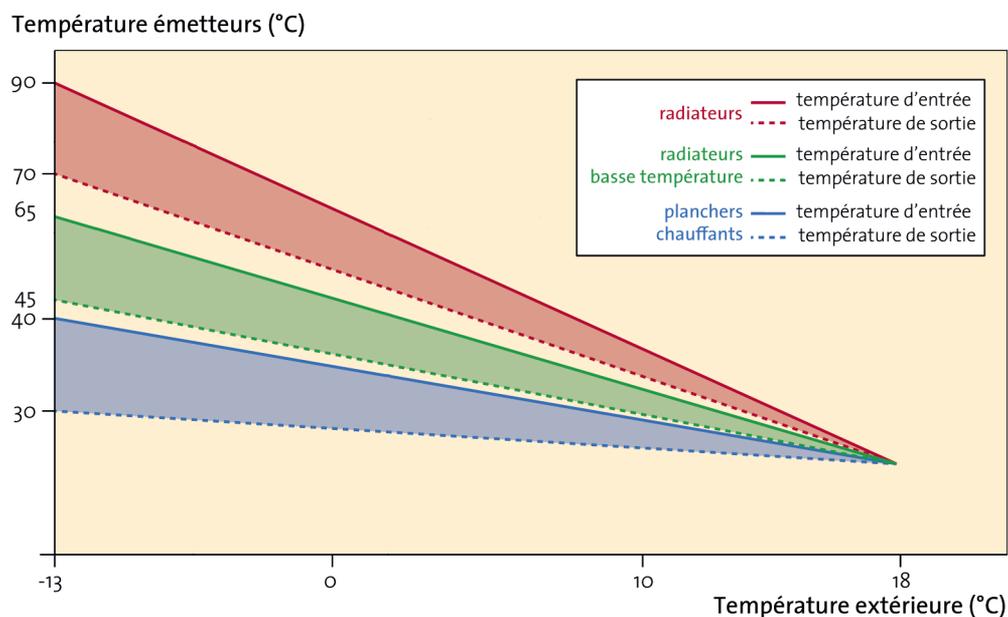
4 Régulation de l'émission

4.1 Lois de régulation dites lois d'eau

Les températures aller-retour des systèmes d'émission sont fonction des surfaces des émetteurs de chaleur. Comme précisé précédemment, le coefficient de performance de la PAC sera d'autant meilleur que l'écart de température entre source froide et source chaude est faible. Par ailleurs le COP instantané s'améliore lorsque la température extérieure augmente.

La régulation du débit pompé peut se faire de façon à garder une température constante dans le système. Pour diminuer les consommations de circulation et dans le cas d'un raccordement en série, l'échangeur géothermique peut être mis oeuvre de façon à permettre la mise en route en cascade de portions d'échangeur géothermique.

Lois de régulation dites lois d'eau.



4.2 La régulation en pratique

La régulation des installations géothermiques se fait à deux niveaux.

- Un niveau local, généralement embarqué dans les équipements types pompes à chaleur, qui permet de gérer les consignes et cycles de fonctionnement des appareils. Ce niveau est suffisant pour assurer la gestion d'installations fonctionnant en mode chauffage ou réversible, il peut être complété avec des programmeurs fonctionnant en tout-ou-rien et de manière périodique pour assurer le fonctionnement des auxiliaires. Dans certains cas, les pompes à chaleur géothermales prévoient en natif la gestion des auxiliaires.
- Un niveau global qui vient compléter le niveau local. Celui-ci s'avère nécessaire dès lors que des modes de fonctionnement hybrides ou optimisés sont recherchés (par exemple, utilisation d'appoint, fonctionnement couplé avec d'autres énergies type solaire, optimisation de l'efficacité énergétique de l'ensemble, gestion du geocooling et couplage par PAC réversible). Le niveau global nécessite l'insertion dans l'installation d'équipements d'automatisme (automates programmables) de capteurs (températures, débit, compteurs énergétiques...) et d'actionneur (vannes motorisées, variateurs de vitesse...) qui collaborent avec le niveau local pour imposer les consignes et contrôler les cycles de fonctionnement de l'ensemble de l'installation en accord avec les besoins instantanés du bâtiment. Les équipements choisis au niveau local – et notamment les pompes à chaleur – doivent donc être ouverts : ils doivent présenter une interface apte à les faire dialoguer avec les équipements d'automatismes (protocoles propriétaires ouverts ou standard types MODBUS, LON, OPC, etc.).

Dans tous les cas, la régulation doit être prise en compte dès les premières phases de conception de l'installation géothermique et ne doit pas être négligée, car elle assure la cohérence et la performance de l'installation. De ce fait, la sélection des équipements doit prendre en compte leurs possibilités à cet égard.

5 Bilan énergétique

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

Le comparatif porte sur les quatre configurations suivantes :

- PAC eau/eau géothermique ;
- PAC eau/eau géothermique en rafraîchissement direct ;
- PAC air eau ;
- groupe froid et chaudière gaz.

	Consommations	PAC eau/eau	PAC eau/eau rafraîchissement direct	PAC air/eau	Groupe froid et chaudière 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	Chauffage	2,99		2,14	0,69
	Climatisation	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 (électricité) 1 161 946 (gaz)

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 bilan en énergie finale est largement favorable à la solution PAC eau/eau par rapport à une solution de référence (chaudière gaz et groupe froid).

6 Simulation thermique dynamique du bâtiment

Une simulation thermique dynamique du bâtiment permet de collecter des informations sur les consommations de chaud et de froid au pas de temps horaire et aussi de calculer les EFLH (*equivalent full load hours*), c'est-à-dire les valeurs équivalentes des consommations annuelles de chaud et de froid en heures de fonctionnement à puissance crête. Ces valeurs sont utilisées pour dimensionner les échangeurs des systèmes géothermiques fermés par de nombreux logiciels.

Besoins réels de chaud et froid

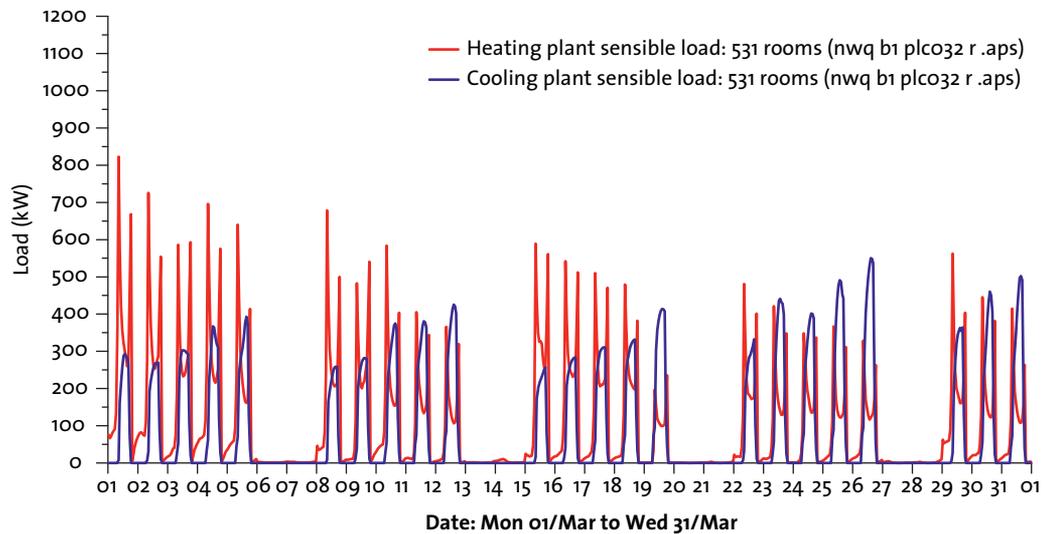
Il est important de noter que les charges de chaud et de froid obtenues en suivant la réglementation thermique sont des valeurs typiques et ne sont par conséquent pas représentatives des besoins réels de chaud et de froid du bâtiment.

Ces besoins réels peuvent être approximés par la simulation thermique dynamique.

Coïncidences des charges

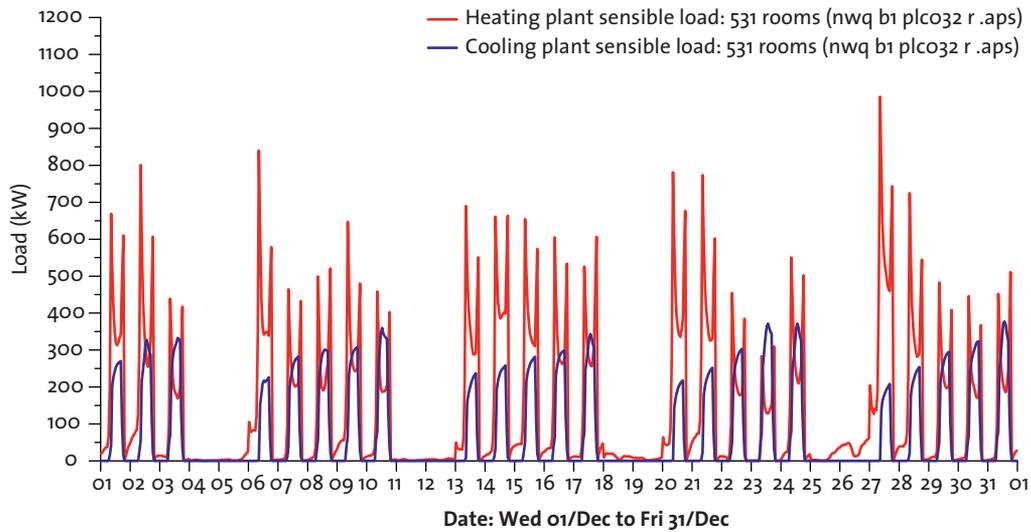
Le dimensionnement de l'échangeur géothermique (couple débit température) dépend non seulement des besoins en chaud et froid crête et des consommations de chaud et de froid sur l'année mais aussi des coïncidences de ces besoins sur la journée. Les courbes suivantes, sorties d'un logiciel de simulation thermique dynamique, montrent les coïncidences des demandes de chaud et de froid dans un immeuble de bureaux pour la mi-saison, en été et en hiver.

Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux à la mi-saison.



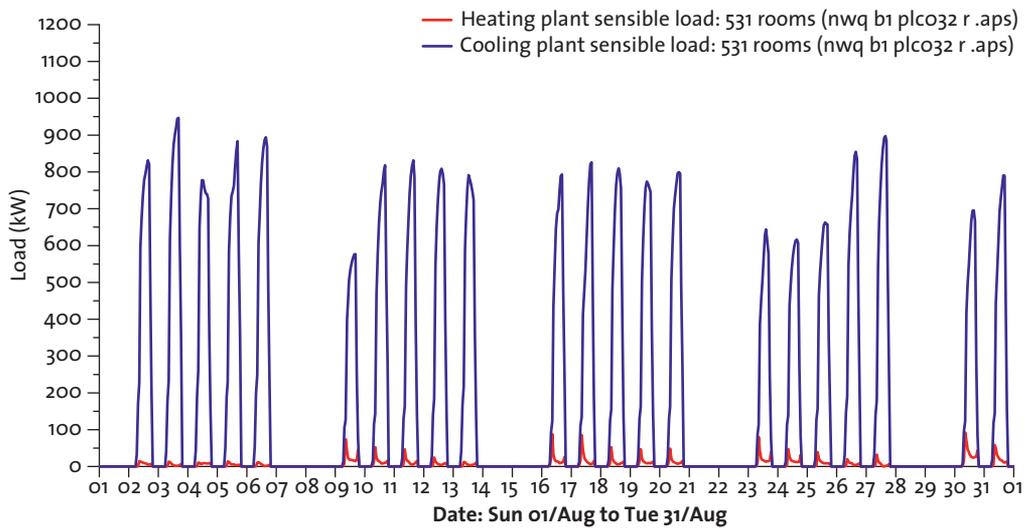
Source : Alto Ingénierie.

Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux en hiver.



Source : Alto Ingénierie.

Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux en été.



Note : Le graphique suivant ne tient pas compte des besoins en eau chaude sanitaire qui coïncideront avec la demande de climatisation.

Source : Alto Ingénierie.

Caractéristiques du sous-sol

La mise en œuvre d'un dispositif d'exploitation énergétique d'un aquifère superficiel assisté par pompe à chaleur repose, entre autres, sur la connaissance des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère qui permettent de définir les éléments nécessaires à l'évaluation de la faisabilité d'un projet et à son dimensionnement, tels que :

- l'exploitabilité de l'aquifère ciblé (débits disponibles) ;
- la profondeur d'accès à la ressource en eau de cet aquifère ;
- son caractère artésien ou pas ;
- ses caractéristiques thermiques ;
- ses caractéristiques géochimiques.

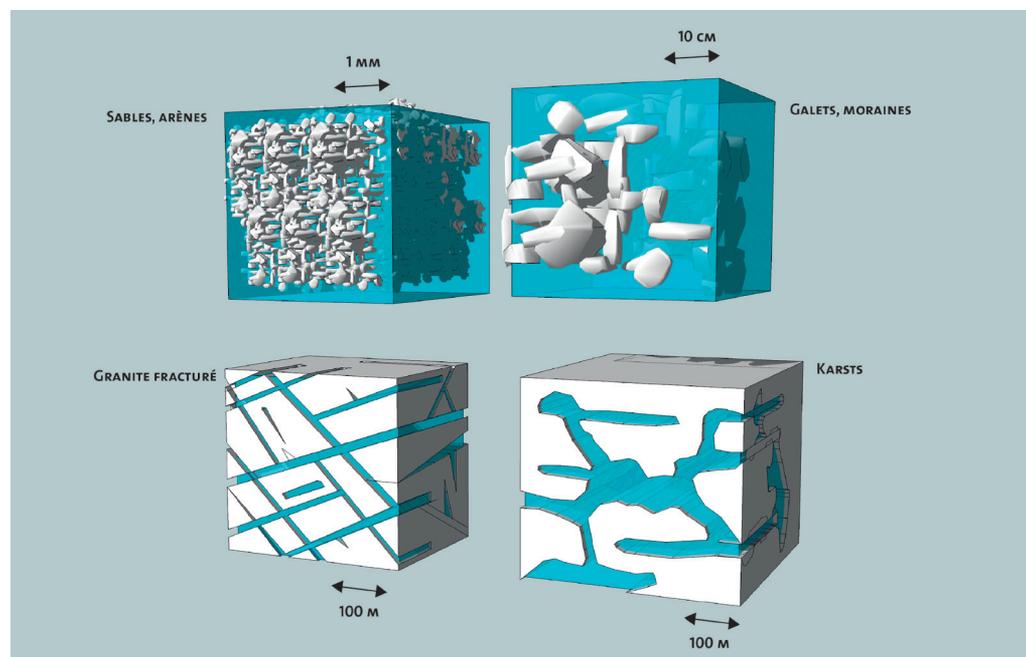
Ces informations sont obtenues par l'analyse des paramètres caractéristiques décrits ci-dessous.

1 Paramètres du réservoir

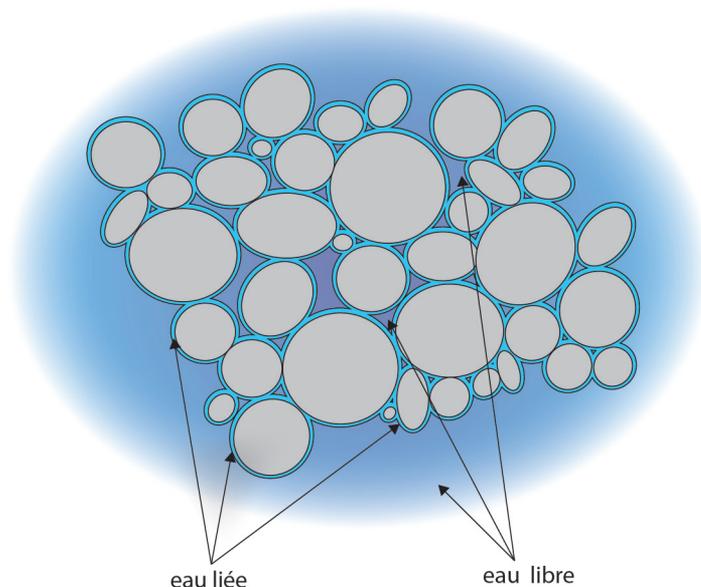
1.1 Porosité

L'eau souterraine est contenue dans la porosité de la roche réservoir. La porosité est une grandeur physique qui correspond au rapport du volume de vides de la roche sur le volume de roche total. Elle est représentative du caractère capacitif de l'aquifère, c'est-à-dire de la quantité d'eau qu'il est capable d'emmagasiner. Selon la nature de la roche et le contexte géologique local, la porosité peut être de différents types : porosité d'interstices constituée des vides présents entre les grains de la roche ; porosité de fissure constituée des vides créés par la fissuration ou la fracturation de la roche.

Différents types de porosité.



Porosité d'interstices.



Seule une partie de l'eau contenue dans la porosité est mobilisable (disponible pour l'écoulement), c'est l'eau libre. L'autre partie, adsorbée sur les parois des grains, est appelée eau liée.

Porosité efficace et coefficient d'emmagasinement sont des paramètres qui rendent compte de la quantité d'eau mobilisable par l'aquifère pour une diminution de pression (par pompage) donnée. La porosité efficace ou coefficient d'emmagasinement libre est utilisée dans le cas des aquifères à nappe libre*, tandis que le coefficient d'emmagasinement captif est utilisé dans le cas des aquifères captifs.

1.2 Perméabilité

La perméabilité rend compte de la capacité d'un milieu poreux (d'une roche donnée) à se laisser traverser par l'eau. Elle est représentée par le coefficient de perméabilité K ou conductivité hydraulique (unité : m/s) qui permet d'évaluer le flux d'eau souterraine pouvant traverser le milieu poreux sous l'effet d'une différence de pression.

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

Le coefficient de perméabilité est représentatif du milieu poreux et des caractéristiques du fluide qui, pour le cas de l'eau, varie en fonction de la température et de la salinité. Le milieu poreux est caractérisé par une grandeur intrinsèque, la perméabilité (k), exprimée en m^2 ou en darcy ($10^{-12} m^2$). Les deux valeurs sont reliées par l'équation suivante :

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

avec ρ la masse volumique du fluide (kg/m^3),
 $k\rho g/\mu$ sa viscosité ($kg/m/s$),
 g l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

Porosité et perméabilité sont deux notions bien distinctes : une roche peut être poreuse mais imperméable (argile). La perméabilité dépend du degré d'interconnexion entre les pores de la roche.

1.3 Transmissivité

La transmissivité (K) rend compte de la capacité d'un aquifère (caractérisé par sa perméabilité et son épaisseur) à laisser s'écouler l'eau souterraine sous l'effet d'une différence de pression.

$$T = K \times e$$

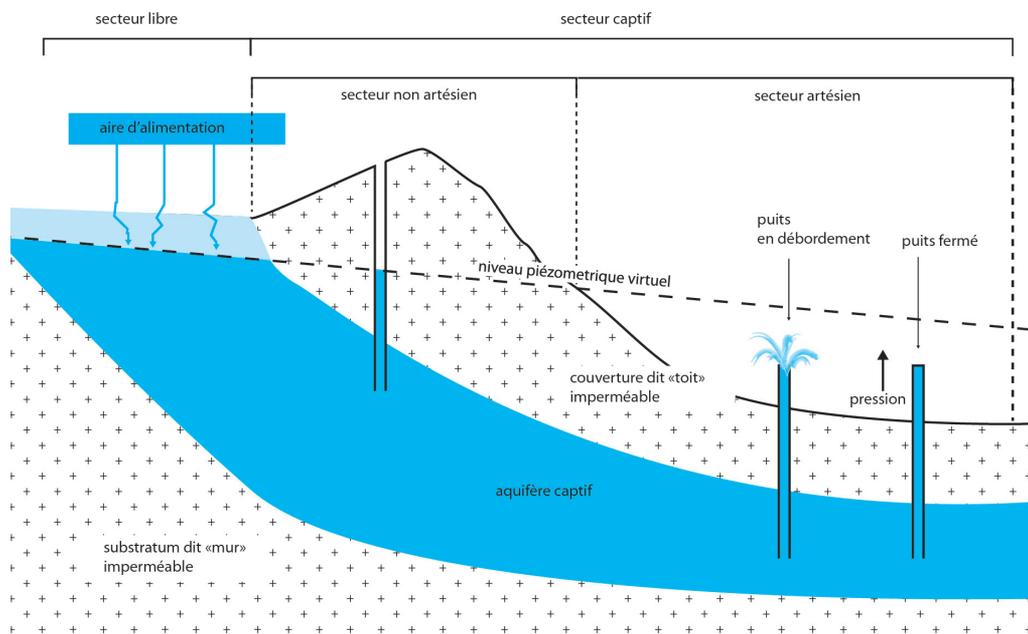
où e est l'épaisseur saturée de l'aquifère,
 T s'exprime en m^2/s .

La transmissivité d'une nappe captive* est constante dans le temps, tandis qu'elle varie pour une nappe libre, l'épaisseur saturée variant au gré des fluctuations du niveau piézométrique*.

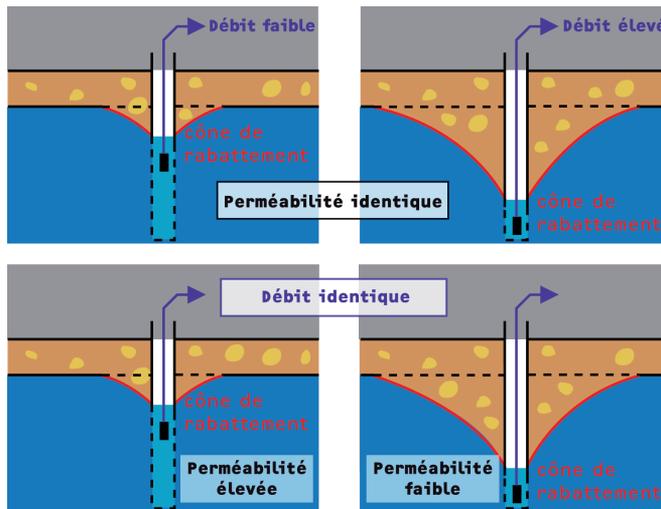
1.4 Pression hydrostatique du gisement

La pression statique du gisement correspond à la pression de l'aquifère dans les conditions naturelles, sans pompage, ni réinjection. Elle est en équilibre avec la pression atmosphérique dans le cas d'une nappe libre, tandis que dans le cas d'une nappe captive, elle est supérieure à la pression atmosphérique. Le niveau d'eau d'une nappe (dit niveau piézométrique) est fonction de cette pression. La répartition des pressions hydrostatiques d'un aquifère est représentée sur une carte piézométrique, qui définit l'altitude du niveau piézométrique de la nappe, au moyen de courbes de niveaux piézométriques (isopièzes ou hydro-isohypses).

Représentation simplifiée d'un gisement.



Sous l'effet d'un pompage, on constate un abaissement de la surface piézométrique. Ce phénomène (voir figure ci-dessous) est désigné sous le terme de rabattement.



Relations perméabilité, débit, rabattement dans le captage

1.5 Température

La chaleur emmagasinée dans un aquifère provient principalement du gradient géothermique qui se traduit par une augmentation de la température d'environ 3,3 °C tous les 100 mètres (cas du Bassin parisien). Le rayonnement solaire joue un rôle prépondérant dans l'apport d'énergie sur les premières dizaines de mètres du sous-sol ; il intervient donc dans le cas des aquifères superficiels. Une classification des températures d'eaux souterraines en fonction de leur intérêt pour une utilisation énergétique est proposée :

- $T < 10\text{ °C}$: peu favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage ;
- $10\text{ °C} \leq T < 15\text{ °C}$: très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage, en mode climatisation et au free-cooling ;
- $T > 15\text{ °C}$: très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage, mais défavorable en mode climatisation.

La connaissance des paramètres du réservoir est primordiale pour évaluer l'exploitabilité d'un aquifère. Celle-ci est définie, pour un usage géothermique, par la capacité de l'aquifère à fournir un débit d'eau en adéquation avec le besoin énergétique du projet, mais aussi par sa capacité à absorber le même débit quand le choix de la réinjection a été fait. Il faut aussi connaître la profondeur d'accès à la ressource qui correspond, dans le cas d'un aquifère libre, à la piézométrie de la nappe et à la profondeur du toit de l'aquifère, dans le cas d'un aquifère captif.

2 Paramètres du fluide

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

2.1 Les colmatages

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

On peut rencontrer :

- des dépôts de carbonates et de sulfates ;
- des précipités de composés ferreux, manganoux, qui peuvent à terme obstruer totalement l'ouverture des crépines* ;
- des boues engendrées par le développement de bactéries ;
- des particules fines de l'aquifère qui se déposent soit au fond de l'ouvrage, soit autour de la crépine.

2.2 La corrosion

La corrosion peut conduire à des perforations des tubages métalliques, ce qui entraîne 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.

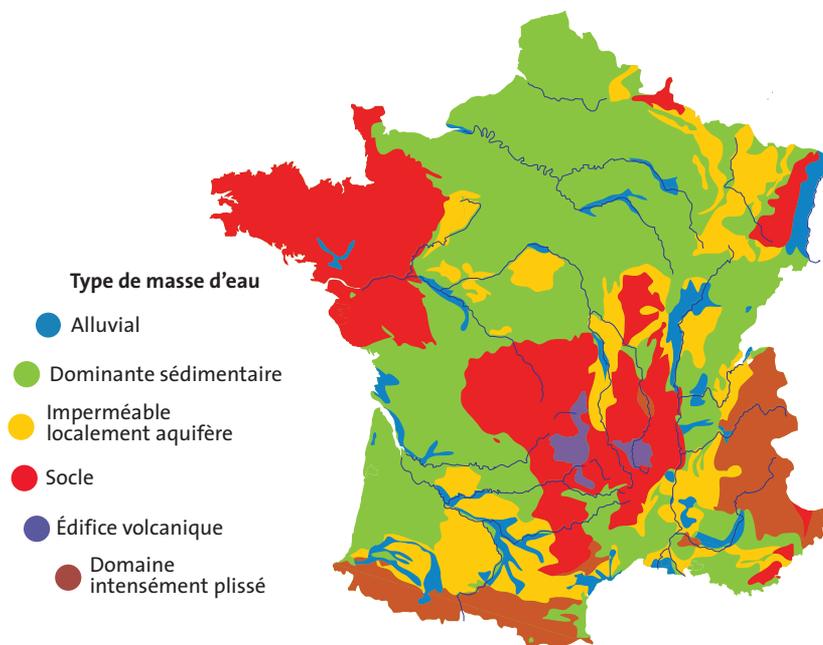
Les conditions d'apparition de la corrosion ou de dépôts sont favorisées par les situations suivantes :

- pH des eaux acides ($\text{pH} < 7$) ;
- présence d'oxygène dissous ;
- présence d'hydrogène sulfuré (H_2S) ;
- présence de CO_2 (> 50 ppm) ;
- présence de chlore (> 300 ppm).

Une classification des eaux souterraines en fonction de leur aptitude à satisfaire l'usage énergétique est proposée par le SEQ-eaux souterraines (système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines), développé par les agences de l'Eau et le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, en collaboration avec le BRGM, en 2002.

L'évaluation du caractère corrosif* (vis-à-vis du calcaire, des métaux et du ciment) ou encroûtant (dépôts calcaires, colmatage bactérien, colmatage par des particules fines) d'une eau souterraine passe par la réalisation de mesures et d'analyses de l'eau, comportant notamment les éléments suivants :

- température, pH, Eh (avec mention de l'électrode de référence), conductivité électrique, alcalinité (TA/TAC), titre hydrotimétrique ou dureté (TH) ;
- cations : Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, NH_4^+ (ammoniaque) ;
- anions : NO_3^- , NO_2^- , PO_4^- , SO_4^{2-} , HS^- , S^{2-} , Cl^- , HCO_3^- ;
- azote total ;
- O_2 dissous ;
- carbone organique dissous (COD) ;
- carbone organique total (COT) ;
- présence de bactéries (ferrugineuses, sulfato-réductrices) ;
- MES (matières en suspension).



Six principaux types de masses d'eau souterraines sont identifiés.

• Alluvial

Les alluvions constituent en général un filtre en relation dans la plupart des cas avec des nappes d'eau souterraine de grande extension (exemple : la craie) dont elles contribuent à assurer le drainage vers la rivière. Leur alimentation à partir de leur impluvium est négligeable en comparaison des apports de la nappe sous-jacente et des échanges avec la rivière.

L'intérêt de ces systèmes est essentiellement leur facilité d'accès à la ressource (aquifères souvent libres, à faible profondeur). Les débits disponibles sont très variables.

• Socle

Dans ce type de masse d'eau souterraine, les ressources en eau sont faibles, les circulations se font dans les horizons altérés discontinus superficiels et dans les systèmes de fracture affectant le massif rocheux où il existe un aléa fort quant à la disponibilité de la ressource (Massif central, Massif armoricain, Maures, Estérel, etc.).

• Édifice volcanique

Souvent de faible potentialité aquifère (Cantal, Cézallier, Mont Dore), l'aléa relatif à la disponibilité de la ressource est fort dans ces réservoirs fracturés, voire poreux et fissurés (Guadeloupe, Martinique, Réunion).

• Dominante sédimentaire non alluviale

Ces masses d'eau souterraine sont constituées d'un ou de plusieurs aquifères superposés en relation étroite. Elles sont libres, à parties libre et captive associées ou à parties libre et captive dissociées (cas de l'Albien-Néocomien composé d'une masse d'eau captive et de plusieurs masses d'eau libres). Elles peuvent constituer des cibles intéressantes pour la géothermie, mais certaines d'entre elles (en particulier les massifs karstiques) peuvent présenter une très grande hétérogénéité vis-à-vis de la ressource disponible (volumes, débits) et de son accessibilité (circulations au sein de systèmes de fractures).

- **Système hydraulique composite intensément plissé de montagne**

Ces masses d'eau sont composées d'une alternance d'entités aquifères et imperméables de lithologie, de taille et d'extension très variables (Alpes, Pyrénées, Montagne Noire). Elles sont susceptibles de présenter un potentiel géothermique intéressant, mais difficile à évaluer à l'échelle régionale et nécessitant une évaluation locale.

- **Système imperméable localement aquifère**

Il s'agit de petits aquifères disjoints et disséminés dans une formation de type sédimentaire peu ou pas aquifère et ne présentant donc *a priori* que peu d'intérêt pour la géothermie.

Dimensionnement d'une solution PAC sur aquifère

Le présent document traite de l'exploitation de l'eau des nappes superficielles (entre 10 et 100 mètres de profondeur), comme source froide ou chaude de pompes à chaleur.

Les informations présentées ne peuvent être appliquées aux milieux fissurés qu'avec précaution.

L'exploitation thermique des aquifères par des pompes à chaleur présente de nombreux atouts :

- l'eau du réservoir utilisée comme fluide caloporteur permet un transfert efficace de la chaleur entre le réservoir et la surface, grâce à sa forte capacité calorifique ;
- la stabilité de la température des eaux souterraines permet d'obtenir des COP élevés ;
- les nappes superficielles peuvent être exploitées avec de forts débits.

1 Principes de dimensionnement d'un doublet

Il est généralement obligatoire et avantageux de réinjecter les eaux après exploitation de leurs propriétés thermiques. La réinsertion dans l'aquifère d'un débit égal à celui prélevé grâce à un second forage (dispositif du doublet) permet en outre de maintenir le bilan hydraulique de l'aquifère-réservoir et de limiter en intensité et en étendue l'impact de l'exploitation sur les pressions de la nappe. Ci-après le dimensionnement d'un **doublet de forage** est évoqué par une approche simplifiée à l'aide d'abaques et de formules.

L'**hypothèse** d'un réservoir homogène d'extension horizontale infinie et d'épaisseur constante est retenue. L'exploitation est supposée à débit constant. Des fluctuations de débit de courte durée par rapport au temps de percée ont peu d'influence sur le comportement global. Il suffit alors de prendre en compte un débit fictif continu conduisant au traitement des mêmes volumes d'eau par cycle.

2 Le temps de percée

L'eau prélevée au puits de production est réinjectée après avoir été refroidie ou réchauffée. Les frigories (ou calories) injectées créent une zone froide (ou chaude) d'extension croissante autour du forage d'injection. Cette perturbation thermique peut parvenir au forage de production à l'issue d'un temps de fonctionnement (temps de percée) plus ou moins long.

3 Le taux de recyclage

En fonction de la vitesse d'écoulement régional de la nappe et de l'orientation de l'axe du doublet par rapport à cet écoulement, le recyclage peut être total, partiel ou nul. À partir de la date de percée, en cas de recyclage, l'écart thermique exploitable diminue progressivement. S'il devient inférieur à la limite de rentabilité, l'exploitation du doublet doit être abandonnée. L'occurrence de ce phénomène définit la durée de vie de l'installation.

À noter que sur les nappes alluvionnaires, compte tenu de la vitesse d'écoulement de la nappe, les problèmes de recyclage se rencontrent moins souvent.

4 Paramètres à prendre en compte

L'évolution de la température au forage de production dépend d'un certain nombre de facteurs dont l'épaisseur productrice de l'aquifère, le débit exploité, la distance entre les forages, la vitesse d'écoulement de la nappe et l'orientation de l'axe du doublet. La qualité des informations hydrogéologiques rassemblées au départ conditionne donc en grande partie la validité des estimations du comportement thermique du réservoir sur lesquelles le projet sera bâti.

5 Logiciels de dimensionnement de l'échangeur géothermique

Il existe des logiciels à l'attention des ingénieurs thermiciens qui travaillent sur des projets de géothermie de type bâtiment commercial/tertiaire.

Ces logiciels permettent la modélisation de plusieurs zones de bâtiment avec leurs charges de chaud et de froid, et leurs consommations.

Ils utilisent une base de données contenant des informations précises sur le rendement des pompes à chaleur du marché à différents débit et températures.

Les calculs prennent en compte les types de sol, l'écoulement de la nappe et les effets thermiques à long terme qui sont souvent déterminants. Il est possible de prendre en compte les systèmes hybrides pour optimiser le taux de couverture avec l'usage d'une chaudière ou d'un aérorefrigérant extérieur.

Les résultats de la modélisation peuvent donner le nombre de forages d'eau et la profondeur, le débit de pompage ou de réinjection, l'impact sur la température de la nappe, le rendement du système géothermique en chaud et froid, les températures d'entrée/sortie de la PAC et les pertes de charge du système.

Mise en œuvre d'une solution PAC sur aquifère

Note : la mise en œuvre de l'ouvrage devra être réalisée conformément à la NF X10-980 et NF X10-999.

1 Outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur géothermiques sur aquifère¹⁵

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

2 Principales caractéristiques de l'aquifère

La **profondeur de la cible** (m) permet 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.

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).

Le critère de la profondeur de la cible est déterminant à la fois en terme 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 terme de coût (directement lié à la profondeur forée).

L'**épaisseur** (m), par exemple, de 1 à 10 mètres, 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).

Le **débit potentiel** (m³/h), par exemple, de 2 à 10 m³/h. 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.

La **minéralisation**, dont l'échelle d'évaluation est la suivante :

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

¹⁵ – Consultable sur le site www.geothermie-perspectives.fr

3 Analyse hydrogéologique du site

L'analyse hydrogéologique consiste à identifier le potentiel du sous-sol et de la ressource. Pour statuer de manière plus précise sur les possibilités géothermiques de l'aquifère, 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 ;
- l'incidence géotechnique du projet sur les constructions avoisinantes.

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) ;
- le type de matériaux à utiliser ou à proscrire en fonction de la nature de l'eau captée.

Ce travail doit être réalisé par des personnes maîtrisant l'opération dans son ensemble.

4 Équipements du forage

4.1 Colonne captante

La colonne captante d'un forage est constituée par des tubes plein, des tubes crépinés, un bouchon de fond, des centreurs et un massif de gravier surmonté d'une cimentation.

Le diamètre du tubage doit être adapté au besoin de l'exploitation (diamètre des pompes). Sa qualité (PVC, inox, acier) est essentielle pour la durée de vie de l'ouvrage.

À noter, dans le cas d'utilisation d'inox, l'inox 316L présente une meilleure résistance à la corrosion pour un faible surcoût.

4.2 Crépines

Les crépines sont des tubes perforés placés à la suite du tubage plein* pour capter l'eau de l'aquifère. Elles doivent être placées en face d'un seul aquifère ; leur qualité peut être la même que celle du tubage.

En ce qui concerne la crépine à fils enroulés en INOX 316L, elle garantit un taux d'ouverture optimisé, ce qui permet de diminuer les pertes de charges.

4.3 Centreurs

Les centreurs évitent que la colonne captante « flambe » et que le tubage se colle à la paroi du forage.

4.4 Massif de gravier

Constitué de graviers de silice (peu altérable) calibrés, lavés, désinfectés, il joue un rôle de filtre et améliore les conditions hydrodynamiques aux alentours immédiats de la zone de captage*. Il joue également un rôle de soutènement des parois du forage et en améliore ainsi la longévité.

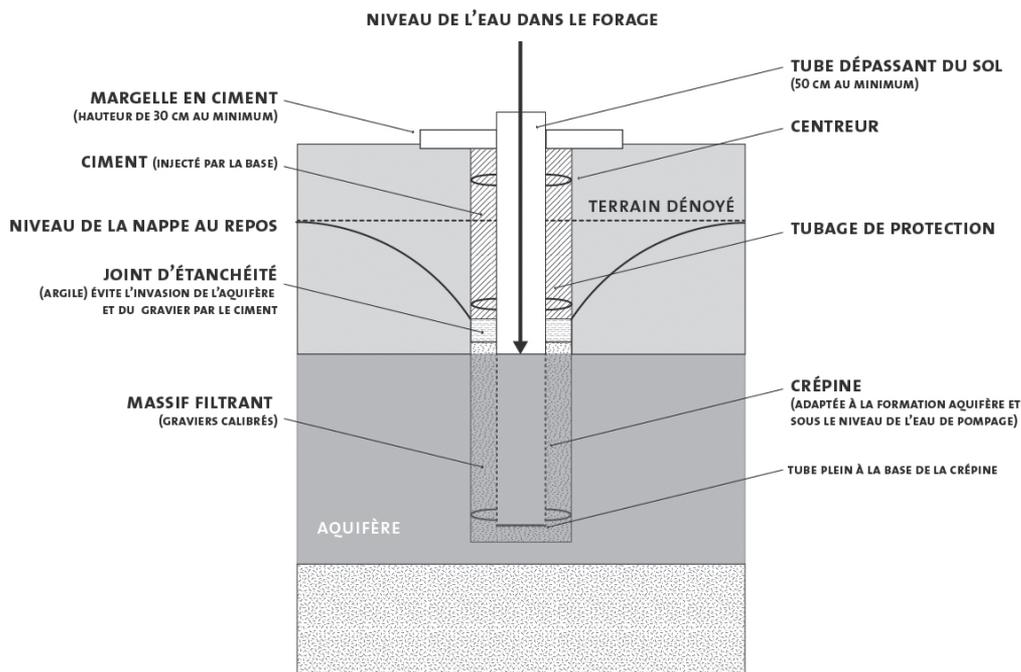
4.5 Cimentation

La cimentation protège l'aquifère de possibles infiltrations depuis la surface et isole les aquifères non captés des aquifères captés, évitant d'éventuelles contaminations inter-aquifère. Elle maintient les parois du forage et permet le colmatage des pertes. Elle ancre la colonne de tubages et limite sa corrosion.

La cimentation doit atteindre le niveau statique de la nappe ou le niveau imperméable intercalaire dans le cas d'une nappe captive.

Sa qualité doit permettre de résister à différents types d'agression (chimique, mécanique).

Colonne captante.



4.6 Équipement de la tête de forage

La tête de forage et son équipement assurent une protection de l'ouvrage et de l'aquifère contre des infiltrations de surface et d'éventuels actes de vandalisme. Ils permettent également de contenir l'artésianisme.

5 Le développement du forage

Développer un forage consiste à améliorer la perméabilité du milieu aquifère à proximité de la paroi du forage et à nettoyer le forage (fluides de forages, fines dans le massif de gravier). Cela conduit à améliorer et stabiliser le rendement de l'ouvrage.

Différentes techniques existent : air lift (injection d'une émulsion eau/air), pompages par palier, pompage alterné, pistonnage, agents chimiques (acidification).

6 Les pompages d'essai

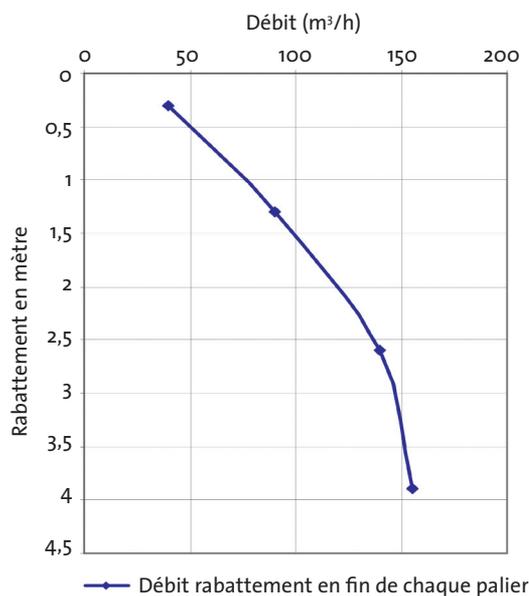
La mise en œuvre de pompages d'essai dans le forage permet de définir les paramètres du milieu et de l'exploitation à venir. Deux types de pompages d'essai doivent être réalisés avant la mise en exploitation d'un forage.

6.1 L'essai de puits ou essai par palier

L'essai de puits permet de définir les caractéristiques hydrauliques d'un forage par l'intermédiaire de sa courbe caractéristique. Celle-ci, véritable carte d'identité, doit être conservée de façon à contrôler au cours du temps le maintien ou la dégradation des propriétés hydrauliques du forage, donc son état de conservation ou de dégradation physique.

Cet essai consiste à appliquer au forage des pompages successifs à débits croissants mais de courtes durées et de suivre le rabattement provoqué dans l'aquifère. Le report sur un diagramme débit/rabattement des résultats de l'essai permet de construire la courbe caractéristique du forage. L'analyse de cette courbe permet d'appréhender les paramètres d'exploitation du forage (débit critique, pertes de charge, débit d'exploitation).

Courbe caractéristique.



Sur cet exemple, le débit critique est atteint pour 125/130 m³/h, car le rabattement chute brutalement après 120 m³/h. Le débit critique est le débit à partir duquel le rabattement est tel que le débit pompé est supérieur aux venues d'eau, le puits « se vide ».

6.2 L'essai de nappe ou essai longue durée

L'essai de longue durée a pour but de tester l'aquifère et d'en déterminer les caractéristiques hydrauliques (transmissivité, coefficient d'emménagement, conditions aux limites). Il permet également de vérifier la disponibilité de la ressource en eau à long terme par rapport aux besoins du projet. Il consiste à appliquer sur un forage un pompage de longue durée (48 à 72 heures, voire plus), à débit constant et à suivre la réponse de l'aquifère en termes de rabattements induits aux environs immédiats du forage. Cette réponse est ensuite analysée par un hydrogéologue, selon différentes méthodes adaptées au contexte hydrogéologique.

Les prélèvements d'eau pour analyse sont généralement réalisés en fin d'essais. Une fois le forage réalisé, équipé, développé et testé, il peut être mis en exploitation ; ce qui suppose le respect du débit d'exploitation préconisé lors des essais et la mise en œuvre d'un protocole de suivi de l'exploitation et de maintenance des installations (contrôle de la productivité du forage, contrôle des équipements).

7 Pompe de forage

La pompe de forage ou pompe immergée doit être dimensionnée de façon à prendre en compte le débit à pomper, la hauteur de la colonne d'eau, la perte de charge du réseau et de l'échangeur.

Il est impératif qu'elle soit équipée d'un variateur de vitesse pour éviter les coûts de bélier au démarrage et pour limiter la consommation d'électricité. Elle doit aussi être asservie au fonctionnement de la PAC

S'il y a plusieurs pompes, celles-ci doivent fonctionner en cascade, en fonction de la demande, de façon alternée tous les mois.

Bien que non obligatoire, il est recommandé de poser un compteur électrique sur chacune des pompes afin de connaître leur consommation.

8 Conditions de rejet des eaux

Après utilisation de l'eau pour l'usage thermique, il est nécessaire de rejeter les volumes utilisés. La voie normale est le rejet dans l'aquifère d'origine.

8.1 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.

Il est nécessaire de calculer la distance entre les puits afin d'éviter une interférence thermique et hydraulique entre le puits de production et le puits de réinjection. Il convient alors de tenir compte de l'écoulement naturel de la nappe d'eau souterraine*.

8.2 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.

9 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 une 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 et la vitesse d'écoulement de la nappe ;
- 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 soit 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. 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.

10 Procès-verbal de réception de l'ouvrage

La réception de l'ouvrage (doublet de forage) est un acte impératif car elle marque le transfert de propriété de l'ouvrage réalisé au maître d'ouvrage.

Il convient donc au terme des travaux, tel que prévu dans le contrat, que la réception soit prononcée et enregistrée par écrit après avoir vérifié la concordance des travaux avec le programme initial.

Le procès-verbal de réception doit être réalisé en trois exemplaires originaux et signé par les parties : le premier à destination du foreur, le second à destination de l'installateur en chauffage et le troisième à destination du maître d'ouvrage.

11 Mise en exploitation, contrôle du bon fonctionnement

La mise en exploitation de l'installation peut faire partie de la réception générale de l'installation. Elle permet en particulier de contrôler le bon fonctionnement de la PAC et des températures entrée-sortie, ainsi que du débit pompé et du rabattement de la nappe.

Exploitation, suivi et maintenance

① 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 des 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 comparable à celle requise par une solution du type « chaufferie + groupe froid ».

Pour la maintenance des pompes à chaleur, il est recommandé d'installer les appareils de mesures suivants qui permettront de réaliser le suivi énergétique de l'installation :

- un compteur d'énergie électrique sur la PAC (obligatoire depuis la RT88) ;
- un compteur de calories sur le départ chaud du bâtiment ;
- un compteur de frigories sur le départ froid du bâtiment.

Ces trois compteurs permettent de déterminer le COP machine en chaud et en froid .

Il est également préconisé la pose de compteur d'énergie électrique sur :

- l'armoire électrique comportant les pompes de circulations condenseur, évaporateur, départ chaud/froid, les pompes immergées ;
- les centrales de traitement d'air.

Ces compteurs représentant un investissement justifié, permettent de réaliser un suivi énergétique et de détecter tout dysfonctionnement. Ils doivent être relevés mensuellement par l'exploitant, les mesures seront analysées et intégrées au rapport mensuel d'exploitation.

En ce qui concerne les PAC, il est préconisé des matériels certifiés Eurovent, ou équivalent.

Si la PAC assure l'intégralité du chauffage, il est recommandé de sélectionner deux machines, si possible à deux circuits chacune (pour les grosses puissances). À noter que certains constructeurs commencent à équiper leur machine de pompe à vitesse variable au niveau du condenseur et de l'évaporateur, un dispositif qu'il peut être intéressant de retenir afin de réaliser des économies d'énergies.

Il est impératif que la loi d'eau soit assurée par la régulation de la PAC (chez beaucoup de constructeur, ce n'est qu'une option).

Une visite périodique est à prévoir : *a minima* deux fois par an.

Elle permet une 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.

Elle permet aussi un entretien préventif par :

- 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).

Pour ces raisons, il est recommandé de souscrire un contrat de maintenance.

Il faut prévoir également une maintenance des éléments des systèmes d'appoint : système introduits pour limiter la taille de l'échangeur ou le nombre de puits : chaudière, aérorefrigérant, etc.

2 Surveillance et entretien du doublet de forages

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.

2.1 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.

2.2 Conditions d'une surveillance efficace

Pour permettre 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).

2.3 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 (*a minima* annuellement) 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 permettent de détecter les colmatages éventuels des ouvrages et d'engager les actions préventives et curatives.

En ce qui concerne les forages, il est impératif que la courbe « débit-rabattement » soit retracée pour le pompage, de même pour la courbe « débit-réinjection » et ce, dès la mise en service de l'installation (état zéro) et ensuite annuellement.

Dans le cas d'une installation importante, la mise en place d'un suivi du niveau piézométrique sur chacun des forages facilite grandement le tracé des courbes « débit-rabattement ».

Il faut rappeler que l'installation doit aussi être équipée d'un compteur de débit d'eau pompée. Il faut *a minima* une fois par an :

- nettoyer le filtre placé sur le forage avant le compteur d'eau ;
 - vérifier la perte de charge de l'échangeur placé entre le forage et la PAC ;
 - vérifier la régulation de vitesse de la pompe de forage.
- 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 ponctuelles ou périodiques (par exemple tous les cinq ou dix ans).

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

2.4 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...).

Réglementation applicable à la réalisation de forage sur aquifère

Note : au 01.01.12 des modifications sont en cours en vue d'une simplification législative. Les informations sont disponibles sur www.geothermie-perspectives.fr.

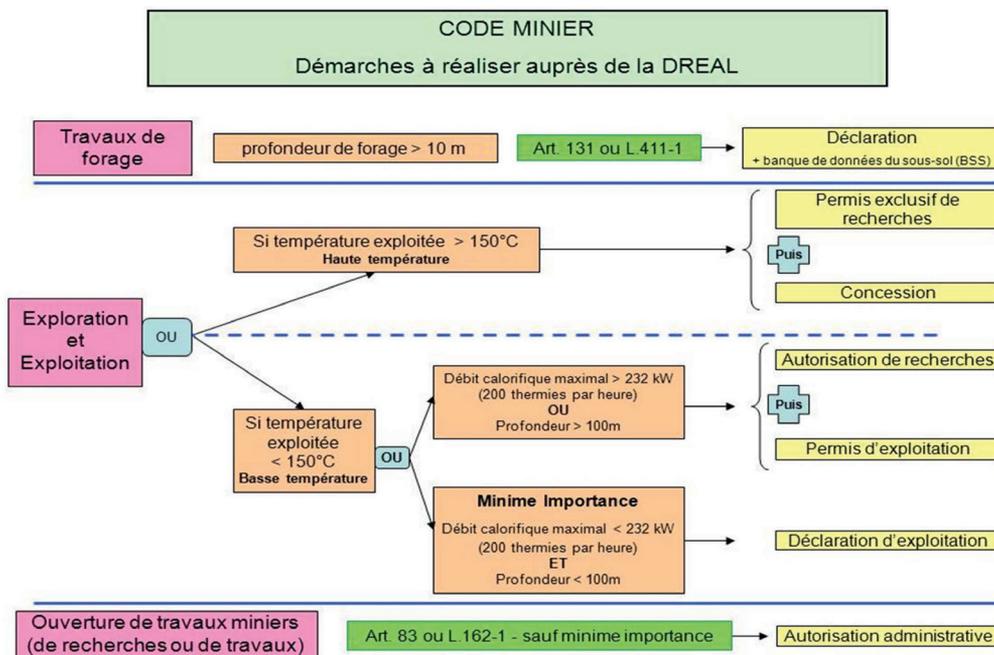
La réglementation qui s'applique à l'extraction de l'énergie sous forme thermique, renfermée dans le sein de la terre, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes, est inscrite dans le code minier, le code de l'environnement, le code de la santé publique, le code général des collectivités territoriales et le code civil.

1 Le code minier

L'introduction de la géothermie dans le code minier date de la loi N° 77-620 du 16 juin 1977.

Le code minier et ses textes d'application relèvent du ministre chargé des mines. La réglementation est appliquée par les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL). Les principaux textes du code minier qui s'appliquent à la géothermie sont indiqués dans le schéma ci-dessous.

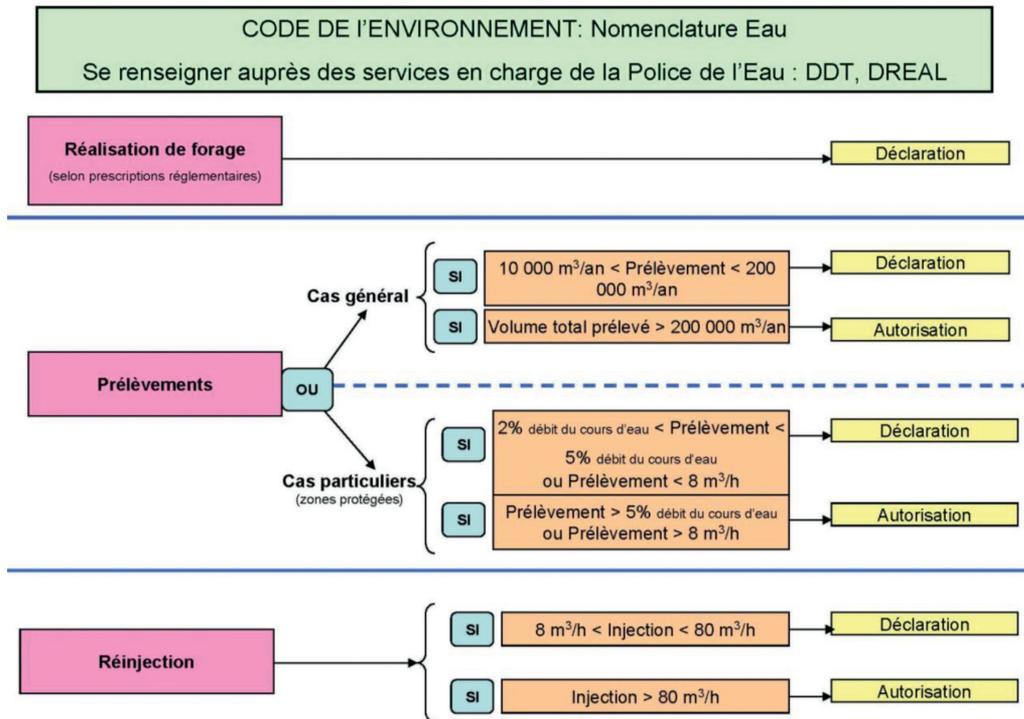
Le code minier définit une géothermie de minime importance pour les opérations dont la profondeur des ouvrages est inférieure à 100 mètres et dont la puissance thermique est inférieure à 232 kW. Pour ces opérations, les démarches sont simplifiées, elles ne sont soumises qu'à déclaration.



2 Le code de l'environnement

Le code de l'environnement relève du ministre chargé de l'environnement.

La nomenclature Eau concerne les IOTA (installation, ouvrage, travaux et activités) à fins non domestiques entraînant des prélèvements et/ou des rejets d'eau souterraine et/ou superficielle.



Dans certains cas, d'autres rubriques de la nomenclature peuvent s'appliquer à des opérations de géothermie (se référer à l'article R 214-1 du code de l'environnement).

Des correspondances existent entre code minier et code de l'environnement. Certaines déclarations et/ou autorisations obtenues au titre d'un code peuvent valoir déclarations et/ou autorisations au titre de l'autre code.

Code minier (CM)		Équivalences inter-codes ⁴	Code de l'environnement (CE)
Géothermie haute température	Titres II - Travaux de recherche : permis de recherche	Régime CM vaut pour régime CE →	Rubrique 1.1.1.0 – Réalisation sondage, forage, ... en lien avec les eaux souterraines : déclaration Rubrique 1.1.2.0 - Prélèvement d'eau souterraine (cas général) : autorisation si $Q \geq 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$ // déclaration si $10\,000\text{ m}^3/\text{an} < Q < 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$. Rubrique 1.2.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en nappe d'accompagnement de cours d'eau : autorisation si $Q \geq 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $Q \geq 5\%$ du débit du cours d'eau // déclaration si $400\text{ m}^3/\text{h} < Q < 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $2\% < Q < 5\%$ du débit du cours d'eau. Rubrique 1.3.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en ZRE ⁵ : autorisation si $Q \geq 8\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $Q < 8\text{ m}^3/\text{h}$. Rubriques 2... - Rejets d'eau Rubrique 5.1.1.0 – Réinjection dans une même nappe : autorisation si $Q \geq 80\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $8\text{ m}^3/\text{h} < Q < 80\text{ m}^3/\text{h}$ Rubrique 5.1.2.0 - Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques : autorisation
	Titre III - Travaux d'exploitation : concession minière		
	Titre IV - Ouverture de travaux (Art 83) :		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM ←	
Géothermie basse température (régime normal)	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	Régime CM vaut pour régime CE →	
	Titre V (Art.98) : Travaux de recherche : permis de recherche		
	Titre V (Art. 99) - Travaux d'exploitation : permis d'exploitation		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM ←	
Géothermie basse température de minime importance	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	Régime CM vaut pour régime CE →	
	Titre V (Art. 102) + décret 78-498 (Art 17) – Minime importance : déclaration selon modalités Art 131.		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM ←	

⁴ Pour qu'il y ait équivalence inter-code, le dossier de déclaration et/ou d'autorisation déposé auprès des administrations compétentes doit comporter l'ensemble des pièces exigées indépendamment par chacun des codes.

⁵ ZRE : Zone de Répartition des Eau (zone où des mesures permanentes de répartition quantitative de la ressource sont instituées)

3 Le code de la santé publique

Le code de la santé publique relève du ministre chargé de la santé. Il s'applique au cas particulier des forages destinés à un usage alimentaire (eau destinée à la consommation humaine ou utilisée dans l'industrie agroalimentaire).

Si l'ouvrage destiné à un usage thermique est également utilisé pour une application entrant dans ce champ, il tombe sous le coup du code de la santé publique.

Ainsi, lorsque le prélèvement d'eau dans le milieu naturel est destiné à la consommation humaine ou à une entreprise agroalimentaire, il est soumis à autorisation (articles R1321-6 à R1321-10 et R1322-4 du code de la santé publique) auprès de l'Agence régionale de la santé (ARS).

4 Le code général des collectivités territoriales

Depuis le 1^{er} janvier 2009, tout particulier utilisant ou souhaitant réaliser un ouvrage de prélèvement d'eau souterraine (puits ou forage) à des fins d'usage domestique doit déclarer cet ouvrage ou son projet en mairie.

L'usage domestique de l'eau est défini dans l'article R214-5 du code de l'environnement. Il s'agit :

- des prélèvements et rejets destinés à la satisfaction des besoins des personnes physiques et animaux résidents (consommation, hygiène, lavage, productions végétale et animale familiale) ;
- de tout prélèvement inférieur à $1\,000\text{ m}^3/\text{an}$.

Certaines communes ont pris des arrêtés spécifiques concernant les forages sur leur territoire ; il est important de se renseigner préalablement en mairie pour connaître l'existence ou non de dispositions communales particulières.

5 Le code civil

Une opération sur aquifère avec pour objectif d'alimenter une pompe à chaleur est soumise à la garantie décennale, l'échangeur étant directement lié à l'installation thermique de surface.

La responsabilité du constructeur sur les défauts et dysfonctionnement d'un ouvrage est donc engagée pendant **10 ans** (attestation d'une police d'assurance responsabilité civile décennale) (art. 1792, 2270 code civil).

6 Redevances pour prélèvement sur la ressource en eau (code de l'environnement)

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.

La loi du 30 décembre 2006 (LEMA) a exonéré de la redevance pour prélèvement d'eau les prélèvements liés à la géothermie. Le décret 2007-1311 du 14 septembre 2007 a précisé les modalités de calcul des redevances, dont celle relative aux prélèvements d'eau. Puis un arrêté du 9 novembre 2007 a complété le dispositif de calcul de l'assiette de la redevance pour prélèvement sur la ressource en eau. Aucun de ces textes réglementaires n'a abordé la question de la géothermie, par principe hors du champ d'application de la redevance de par la loi.

Une circulaire n°6/DE du 15 février 2008 relative à l'application des redevances a précisé (annexe IV) la notion de prélèvements liés à la géothermie. En voici le texte ci-dessous :

« Les « prélèvements liés à la géothermie » doivent être considérés comme les prélèvements d'eau dans des gisements géothermiques utilisés pour la production d'énergie calorifique ou électrique identifiés en application du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié, relatif aux titres de recherche et d'exploitation de géothermie. »

Ce décret distingue à cet effet :

- les gisements géothermiques à haute température (> 50 °C) ;
- les gisements géothermiques à basse température (> 150 °C). Le décret précise que sont considérées comme exploitations géothermiques à basse température de minime importance et dispensées de l'autorisation de recherche et de permis d'exploitation prévus aux articles 98 et 99 du code minier, les prélèvements de chaleur souterraine dont le débit calorifique maximal possible calculé par référence à une température de 20 °C est inférieur à 200 thermies par heure et dont la profondeur est inférieure à 100 mètres.

Les prélèvements des pompes à chaleur qui utilisent des ressources thermiques d'aquifères peu profonds dont la température est généralement comprise entre 10 et 15 °C sont donc inclus de fait de cette définition des gisements géothermiques.

En conséquence, les prélèvements des pompes à chaleur seront exonérés de la redevance pour prélèvement sur la ressource en eau.

Mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives

① Garantie Aquapac[®] pour les opérations de pompes à chaleur sur aquifères superficiels

Pour pallier l'incertitude locale sur la disponibilité et/ou la pérennité de la ressource en eau souterraine, la garantie Aquapac[®] a été initiée en 1983 sous l'égide de l'ADEME, d'EDF et du BRGM.

Elle offre une double garantie :

- la garantie « recherche », qui couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour fournir le débit d'eau nécessaire au projet. Le taux de cotisation pour cette garantie est de 5 % du montant des ouvrages garantis en recherche ;
- la garantie « pérennité », qui couvre les risques de diminution à terme des débits d'exhaure et d'injection, et de détérioration de la qualité de l'eau qui seraient liées à une détérioration prouvée de la ressource (hors variations saisonnières du débit et/ou cycles hydrologiques normaux). La durée de cette garantie est de 10 ans¹⁶ et son taux de cotisation est de 4 % du montant des ouvrages garantis en pérennité.

La garantie Aquapac s'applique aux installations d'une puissance thermique supérieure à 30 kW.

Sa gestion est confiée à la SAF Environnement¹⁷. L'instruction des dossiers de demande de garantie et la décision d'octroi de garantie sont décidées par un comité composé de trois représentants de l'ADEME, d'EDF et du BRGM. Ce comité se réunit périodiquement, avec la participation de la SAF Environnement. Il statue également sur la recevabilité des éventuels sinistres.

② Les aides financières

L'ADEME et les collectivités territoriales (régions en particulier) sont susceptibles d'aider les études de faisabilité et, dans certaines conditions, l'investissement. Pour en savoir plus, consulter les sites des Conseils Régionaux, de l'ADEME, et le site dédié à la géothermie : www.geothermie-perspectives.fr.

Les espaces info-énergie créés par l'ADEME en partenariat avec les collectivités territoriales permettent également d'aiguiller les porteurs de projets (plus particulièrement les particuliers) vers les différents types d'aide (voir www.infoenergie.org).

2.1 Le crédit d'impôt

Le crédit d'impôt développement durable est le principal mécanisme d'aide pour les particuliers, à l'échelon national.

¹⁶ – La durée initiale de la garantie était de 5 ans ; elle a été portée à 10 ans en 1997.

¹⁷ – SAF Environnement, 195 boulevard Saint-Germain, 75007 Paris.

C'est une disposition fiscale permettant aux ménages de déduire de leur impôt sur le revenu une partie des dépenses réalisées pour certains travaux d'amélioration énergétique portant sur une résidence principale. Le taux du crédit d'impôt est fixé chaque année par les lois de finance et est disponible sur le site du ministère en charge du Développement durable. Depuis 2010, l'assiette inclut la réalisation de l'échangeur géothermique.

Peuvent s'ajouter au crédit d'impôt les aides régionales et des aides particulières pour les opérations de rénovation (éco prêt à taux zéro, aides de l'Agence nationale de l'habitat – ANAH –).

2.2 Le Fonds chaleur

L'ADEME a mis en place pour les opérations collectif et tertiaire un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie pour la réalisation d'études réalisées dans les secteurs résidentiel, collectif et tertiaire (diagnostic ou faisabilité) et pour les missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage.

L'ADEME peut également participer au financement de l'investissement, avec la mise en place du Fonds chaleur renouvelable qui est un des engagements majeurs du Grenelle de l'environnement. Doté d'un montant de 1,2 milliard d'euros pour la période 2009-2013, ce dispositif permet de financer les projets utilisant la chaleur renouvelable dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire et de l'industrie.

Le principe régissant le calcul des aides du Fonds chaleur est de produire la chaleur renouvelable à un prix inférieur d'environ 5 % à celui de la chaleur issue d'énergie conventionnelle. Le montant exact des aides est évalué au cas par cas pour les projets de géothermie.

Le Fonds est géré par l'ADEME au niveau régional en synergie avec les régions notamment dans le cadre des contrats de plan État-Région et en cohérence avec les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie lorsque ces derniers sont définis. Le niveau d'aide proposé peut être atteint par le Fonds chaleur seul ou en combinaison avec des aides régionales et/ou le FEDER (Fonds européen de développement régional).

Les aides sont allouées en trois versements :

- 15 % à la notification ;
- 65 % à la réception de l'installation ;
- 20 % sur présentation des résultats de la première ou des deux premières années selon la taille de l'installation.

Les opérations de géothermie éligibles au Fonds chaleur doivent respecter un certain nombre de critères dont une puissance thermique minimum délivrée par la PAC et un COP machine minimal :

- eau de nappe : 50 kW et un COP machine supérieur à 4 ;
- champs de sondes : 30 kW et un COP machine supérieur à 3,7.

Les projets soumis à la réglementation thermique 2012 pour lesquels l'installation de « chaleur renouvelable » est nécessaire au respect de celle-ci ne sont pas éligibles aux aides du Fonds chaleur.

Pour plus d'informations, se référer à la méthode Fonds chaleur disponible sur le site de l'ADEME.

3 Certificats d'économie d'énergie

Le principe des certificats d'économie d'énergie repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les pouvoirs publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie (électricité, gaz, chaleur, froid et fioul domestique). Les certificats sont obtenus à la suite d'actions entreprises en propre par les opérateurs ou par l'achat à d'autres acteurs ayant mené des opérations d'économies d'énergie. Parmi les opérations standardisées figurent notamment la mise en place de « pompes à chaleur type eau ».

Après le succès de la première période (2006-2009), le dispositif a été prolongé début janvier 2011 pour une deuxième période triennale, avec un objectif d'économies d'énergies de 345 TWh_{cumac}.

Les aides du Fonds chaleur ne sont pas cumulables avec les certificats d'économie d'énergie (lorsque ceux-ci portent sur le même objet que l'aide du Fonds chaleur).

Des aides spécifiques existent pour les territoires d'outre-mer. Se renseigner auprès des agences locales de l'ADEME.

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.

Chaque projet ayant ses particularités, seule une analyse détaillée par un bureau d'études spécialisé permet d'évaluer de manière fiable l'intérêt économique de la solution PAC sur aquifère ou sur sondes selon les cas.

1 Système géothermique sur aquifère

1.1 Études et maîtrise d'œuvre

■ Étude de faisabilité	5 000 à 10 000 € 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	15 000 à 27 000 € HT

1.2 Forages et équipements

Le coût parfois élevé des forages (au regard des débits et 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, profondeur des forages pour atteindre la nappe) ;
- une faible concurrence, malgré un potentiel recensé au niveau national d'environ trente foreurs.

Pour beaucoup de ces entreprises, l'essentiel de l'activité concerne des forages pour captage d'eau potable ou pour l'irrigation, donc hors milieu urbain.

Forages

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

Équipements

Sur le poste équipements, les coûts varient suivant de nombreux critères :

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

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.

1.3 Maintenance

Le coût annuel d'un contrat de maintenance des puits et équipements comprend les opérations suivantes :

- deux visites annuelles et la 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 est très variable suivant les conditions d'accès (extérieur ou en local technique, horaires et autres contraintes liées au site).

2 Équipements de surface

2.1 Investissements

Le montant du poste pompe à chaleur 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 raccords)
(ou environ 150 €/kW chaud machine seule).

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 (www.eurovent-certification.com) ou équivalent.

Aspects environnementaux

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

1 L'énergie du sous-sol : une énergie renouvelable

Le sous-sol se recharge thermiquement de manière continue par la circulation d'eau de nappe et les apports solaires (pour la partie supérieure). 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).

2 Émissions de CO₂

La réduction des émissions de gaz à effet de serre constitue aujourd'hui une préoccupation principale au niveau mondial. La France, avec le Grenelle de l'environnement, a engagé un effort sans précédent pour limiter l'ampleur du changement climatique, par la baisse des émissions de gaz à effet de serre contribuant à l'objectif européen de baisse de 20 % à l'horizon 2020.

En 2011, la France a présenté son plan national d'adaptation au changement climatique et des mesures concrètes sont présentées dans le plan climat de la France.

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...).

3 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) ¹⁶
Électricité ¹⁷	
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.

¹⁶ – 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.

¹⁷ – Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France du 14 janvier 2005.

4 Impact des fluides frigorigènes (PAC)

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, le risque est faible, du fait de l'utilisation en circuit fermé.

Les valeurs de réchauffement global ou *Global Warning Potential* (GWP) pour les principaux fluides frigorigènes sont données ci après :

	R410a	R407c	R134a
GWP en kg eq. CO ₂	1 730	1 530	1 300

Domaines d'applications appropriés

① Principes généraux - Choix du système

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.

Dans certaines situations, comme pour de grandes salles de cinéma ou des salles de sport, la charge maximale à couvrir peut être importante. L'installation d'un échangeur géothermique peut être très coûteuse. En outre, l'occupation intermittente de ces locaux signifie de petites consommations par rapport à l'investissement. Dans ce cas, il se peut que la géothermie ne soit pas une solution viable à moins d'avoir des objectifs de consommation énergétique très bas.

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

Pour **les bâtiments anciens**, la décision dépend du système de chauffage existant et de son éventuelle adaptation.

Certaines applications sont plutôt favorables à l'utilisation de pompes à chaleur ; on les classe 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, groupes sportifs (piscines, patinoires), etc. Pour ces applications qui sont en général les mieux adaptées à la géothermie, on utilise le principe de la thermofrigopompe ;
- les applications qui privilégient la réversibilité des pompes à chaleur pour des raisons climatiques, à savoir la fourniture de chaud en hiver et le rafraîchissement en été (immeubles du secteur tertiaire (hôtels, maisons de retraite, etc.), bureaux, certains logements qui exigent un rafraîchissement en été...);
- les applications n'ayant recours qu'à une seule fonction : soit la fourniture de chaud, soit la fourniture de froid. Dans ce dernier cas, on parle de groupe frigorifique.

2 Retours d'expériences

Centre des congrès de Reims (Marne)

Inauguré en septembre 1994, ce bâtiment au signal architectural fort se présentant comme un élégant vaisseau aux lignes élancées est également un modèle environnemental.



© Y.-A. Villysois

Descriptif du bâtiment

Bâtiment neuf – Date de mise en service : 1994

Surface utile : 20 100 m²

Point fort : depuis son ouverture, le centre des congrès a accueilli plus de 2 000 événements qui ont rassemblé plus de 750 000 congressistes. Les retombées économiques représentent aujourd'hui 20 millions d'euros et 300 équivalents emplois chaque année.

Besoins à couvrir/usages attendus

Usage : Chauffage/rafraîchissement par la nappe phréatique*.

Volume chauffé et rafraîchi : 80 000 m³.

Point fort : couverture des besoins assurée à 100 % par l'installation de géothermie.

Caractéristiques techniques

Ressource : 2 puits de captage/2 puits de réinjection de 10 mètres de profondeur pour chaque puits permettant un débit de 270 m³/h.

Puissance de/des PAC : 2 thermofrigopompes de 910 kW chacune avec automate de gestion.

Émetteurs : système de ventilation simple et double-flux (principalement), plancher chauffant, radiateurs basse consommation et ventilo-convecteurs.

Point fort : pilotage par un automate de gestion, suivi du profil de consommation et système d'alerte de dépassement de seuils de puissance.

Bilan de fonctionnement

Régime de température de fonctionnement : source froide 6 °C/sortie de PAC 42 °C.

Consommation électrique de/des PAC : 2 557 047 kWh/an (année 2004).

Point fort : coût d'exploitation de 11 €/an/m².

Acteurs du projet

Maître d'ouvrage : ville de Reims.

Maître d'œuvre : cabinet d'architecture Claude Vasconi & Partners.

Installateur : Dalkia – Reims.

Exploitant : Missenard Quint B (Elyo) à Witry-lès-Reims.

Autres partenaires techniques : EDF Collectivités, CARRIER, LANDYS, GYR, Cofely.

Centre national du costume de scène de Moulins (Allier)

La géothermie est particulièrement adaptée pour répondre aux besoins thermiques des bâtiments anciens comme en témoigne cet exemple de réalisation se targuant d'un retour sur investissement estimé à moins de 3 ans.



© J.-M. Tessonier, ville de Moulins.

Descriptif du bâtiment

Un bâtiment neuf et un bâtiment réhabilité – Date de mise en service : 1998.

Surface utile : 5 645 m² (3 300 m² pour la partie réhabilitée + 2 345 m² pour la partie neuve).

Besoins à couvrir/usages attendus

Usage : chauffage/rafraîchissement par la nappe phréatique.

Volume chauffé et rafraîchi : 28 283 m³.

Point fort : besoins de 278 kW chaud et de 222 kW froid.

Caractéristiques techniques

Ressource : 2 forages de prélèvement de 30 m³/h et 2 forages de réinjection à une profondeur de 13 m.

Puissance de/des PAC : 1 PAC thermofrigopompe de 314 kW puissance chaud et 344 kWh de puissance froid chacune.

Émetteurs : ventilo-convecteurs et centrales de traitement d'air.

Point fort : pilotage par une gestion technique centralisée assurant aussi le pilotage de la thermofrigopompe.

Bilan de fonctionnement

Régime de température de fonctionnement : en eau glacée => 7/12 °C en été et 5/10 °C en hiver ; en eau chaude => 45/50 °C en hiver et 30/35 °C en été.

Consommation électrique de/des PAC + pompes : 445 955 Wh/an (2008). COP de fonctionnement 2008 : 3,93.

Point fort : en 2008, la solution PAC sur nappe a fait économiser 26 k€ TTC par rapport à une solution « chaufferie gaz + groupe froid électrique », le surcoût d'investissement était d'environ 60 k€, le temps de retour est estimé à 2,5 ans.

Acteurs du projet

Maître d'ouvrage : CNCS.

Maître d'œuvre : J. Brudin/J.-M. Wilmotte (architectes).

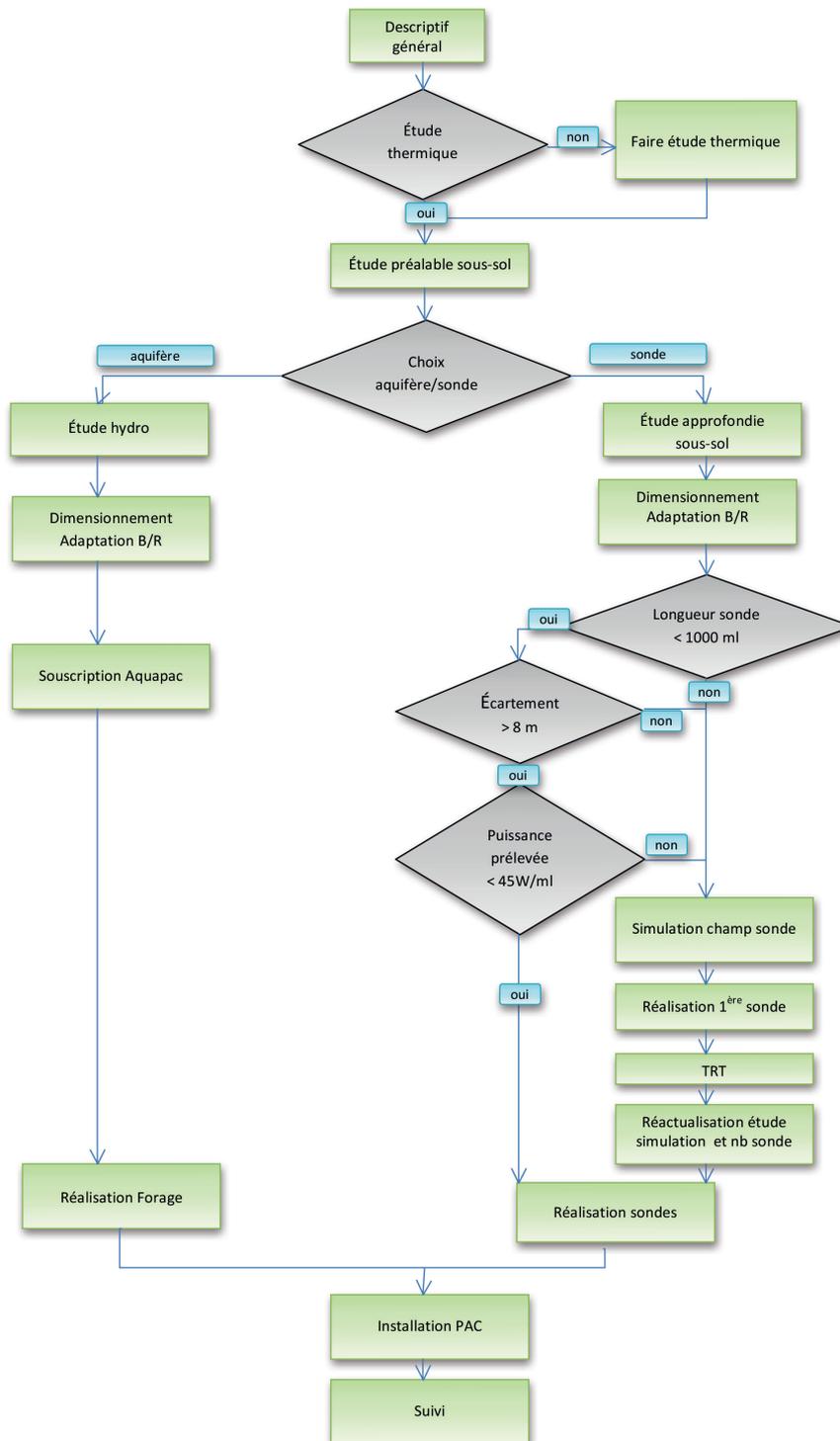
Installateur : Crystal Clermont-Ferrand.

Autres partenaires techniques : EDF R&D.

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

- 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 de préfaisabilité 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 ou équivalent avec loi d'eau intégrée.
- 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.

Annexe : déroulement d'une opération de pompe à chaleur géothermique sur aquifère



Pour en savoir plus

- Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM, avec une rubrique spécialement consacrée aux régions dans laquelle se trouve l'outil d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe.
www.geothermie-perspectives.fr
- Les directions régionales de l'ADEME
www.ademe.fr
- Association française des professionnels de la géothermie (AFPG)
www.afpg.asso.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
- Les DREAL (directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement)
- 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

Milieu souterrain qui contient de l'eau en partie mobilisable par gravité. Ce milieu, constitué de roches perméables et/ou fissurées ou fracturées est suffisamment conducteur d'eau souterraine, pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère comporte une zone saturée en eau et peut comporter une zone non saturée en eau (zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface de la zone saturée pour une nappe libre).

■ 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.

■ Battage

Technique de forage qui consiste, par des mouvements alternatifs, à soulever un outil lourd (trépan) et le laisser retomber pour briser la roche à remonter les déblais avec une cuvette et à descendre de façon concomitante un tubage provisoire. La hauteur de chute et la fréquence des mouvements dépendent de la dureté de la roche.

■ Boue de forage

Fluide 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.

■ Captage

Le terme captage est couramment utilisé pour les captages d'aquifères (captage d'eau souterraine).

■ Cimentation

Remplissage par du ciment de l'espace annulaire entre le tubage et la paroi naturelle du forage. La 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).

■ Circulation directe

Le fluide de forage injecté à l'intérieur des tiges remonte par l'espace annulaire.

■ Circuit primaire

Circuit hydraulique constitué par l'échangeur géothermique (source froide) ainsi que par la liaison jusqu'à la pompe à chaleur géothermique (y compris les réseaux de raccordement).

■ Circuit secondaire

Circuit qui diffuse l'énergie (chaleur ou rafraîchissement) dans le/les bâtiment(s).

■ Climatisation

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

■ **Colonne de production (ou 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...) effectuées sur une couche aquifère, du forage jusqu'à la mise en production.

■ **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.

■ **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 différents types de crépines sont déterminés suivant la forme et le pourcentage des ouvertures ou « slots » alliant résistance mécanique et vitesse de l'eau.

■ **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 maximales de départ jusqu'à 65 °C, augmente les performances en plein hiver et, même en cas de conditions extrêmes, améliore le COP.

■ **Forage artésien**

Forage captant une nappe dont le niveau d'eau remonte spontanément au-delà du niveau du sol.

■ **Foration (terme d'usage)**

■ **Geocooling (freecooling)**

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

■ **Havage**

Méthode qui consiste à mener en parallèle, le creusement des terrains au moyen d'une benne preneuse ou d'un hammer-grab*, et leur soutènement au fur et à mesure de l'avancement.

■ **Hammer-grab**

Benne preneuse circulaire susceptible d'être utilisée avec battage (coquilles bloquées) pour foration en terrains alluvionnaires meubles ou compacts pouvant comporter des blocs.

■ **Incrustant**

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

■ **Marteau Fond de Trou (MFT)**

Méthode de foration à l'air qui utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation ; le marteau étant placé à la base du train de tige.

■ **Massif filtrant**

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 les alluvions situées de part et d'autre d'une rivière. Les eaux de ces nappes peuvent être en liaison hydraulique directe avec les eaux du cours d'eau associé (nappe d'accompagnement).

■ **Nappe captive**

Nappe ou partie d'une nappe soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure à la cote du toit de l'aquifère. La nappe captive est située entre deux couches géologiques imperméables de terrain.

■ **Nappe d'eau souterraine**

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 libre**

Nappe dont la surface piézométrique est à la pression atmosphérique (surface libre). Le niveau de cette nappe peut fluctuer (battements). On distingue ainsi une zone saturée et une zone non saturée.

■ **Nappe phréatique**

Nappe libre souterraine proche de la surface, contenue dans un aquifère, limitée vers le bas et, éventuellement, latéralement.

■ **Nappe superficielle**

La notion de nappe superficielle ou nappe phréatique, imprécise au plan hydrogéologique, caractérise généralement une nappe peu profonde atteinte par les puits ordinaires. En pratique, il s'agit d'une nappe généralement libre à surface proche du sol dont l'alimentation et la qualité sont influencées par les activités de surface.

■ **Niveau piézométrique**

Niveau libre de l'eau mesuré dans un ouvrage en communication avec un aquifère.

■ **Niveau statique (niveau naturel)**

Niveau piézométrique dans un forage non influencé par un prélèvement.

■ Périimètre de protection

Les périmètres de protection visent à assurer la protection de la ressource en eau, vis-à-vis des pollutions de nature à rendre l'eau impropre à la consommation (principalement ponctuelles et accidentelles). Il s'agit d'une protection de l'environnement proche du captage permettant notamment d'assurer la sécurité sanitaire de l'eau et, en cas de pollution accidentelle, de disposer du temps nécessaire pour éviter l'exposition de la population à divers polluants. Pour chaque captage, un hydrogéologue indépendant et agréé en matière d'hygiène publique par le ministère chargé de la santé définit trois niveaux de protection représentés par trois types de périmètres :

- le périmètre de protection immédiate a pour fonctions principales d'empêcher la détérioration des ouvrages et d'éviter les déversements de substances polluantes à proximité immédiate de l'ouvrage. Sa surface est donc limitée à quelques centaines de mètres carrés ;
- le périmètre de protection rapprochée doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration souterraine de substances polluantes. Sa surface dépend des caractéristiques de l'aquifère, des débits de pompage, de la vulnérabilité de la nappe. En France, le temps de transfert entre la pollution et le captage retenu est d'environ 50 jours, ce qui représente suivant les terrains une surface comprise entre 1 hectare et 10 hectares. Sur ce périmètre, peuvent être interdits ou réglementés toutes les activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité de l'eau prélevée ;
- enfin, le périmètre de protection éloignée, qui est facultatif et correspondant à tout ou partie de la zone d'alimentation du captage, est créé afin de réglementer toutes les activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux.

■ Pompage d'essai (essais de pompage, tests de pompage)

Pompage et ensemble des essais permettant : de vérifier la capacité de production du forage (débit) et d'évaluer l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (rayon d'influence).

■ Qualité 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 duresse de l'eau (exprimé en degré français ou °TH) lié à la concentration en ions calcium et qui influe sur le caractère incrustant de l'eau exploitée ;
- les concentrations (en mg.L⁻¹) en ions calcium, sulfates, magnésium qui peuvent produire des dépôts sur les crépines et les parois des pompes, tuyauteries et échangeurs ;
- la concentration (en mg.L⁻¹) de l'ion chlorure qui influe sur le pouvoir corrosif de l'eau.

■ Rabattement

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

■ Rafraîchissement

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.

■ 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.

■ **Tricône**

Outil de forage à trois molettes, à dents ou à picots, spécifique à la technique du rotary.

■ **Tubage plein**

Tubage non ajouré mis en place dans un forage. Ce type de tubage peut permettre d'obturer un niveau aquifère particulier non souhaité. Il peut être utilisé également pour maintenir la stabilité des terrains traversés.

■ **Ventilo-convecteurs**

Appareil terminal de traitement équipé d'un filtre, d'un ventilateur, d'une ou deux batterie(s) d'échange air/eau (« 2 tubes » ou « 4 tubes ») et éventuellement d'une batterie électrique.

Bibliographie

- **Szymanski A.-L., Le Nir M.** (2007) – Synthèse hydrogéologique des aquifères situés au droit de la commune de Massy (91). Rapport final. BRGM/RP-56168-FR, 146 p., 75 fig., 16 tabl.

[1] FD X 10-980, *Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages – Démarches administratives.*

[2] FD X 10-990, *Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages – Captage d'eau minérale ou d'eau de source.*

