

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 sur champs de sondes.

L'utilisation de systèmes thermodynamiques pour assurer soit le chauffage seul, soit le chauffage et le rafraîchissement de locaux, est un procédé 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 champ de sondes ont par ailleurs la particularité de pouvoir être implantés dans les secteurs où les ressources en eau souterraines sont insuffisantes pour alimenter une PAC. Le développement de cette technologie doit donc mettre en adéquation la ressource géothermale, dont la température est imposée par la géologie locale et les besoins énergétiques des bâtiments. Malgré ces contraintes spécifiques, il n'en demeure pas moins vrai que la pompe à chaleur sur champ de sondes 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 filière pompe à chaleur sur champ de sondes 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 : 6660
Réf. BRGM : STCo06

9 782715 925311
Prix : 45 €

www.geothermie-perspective.fr

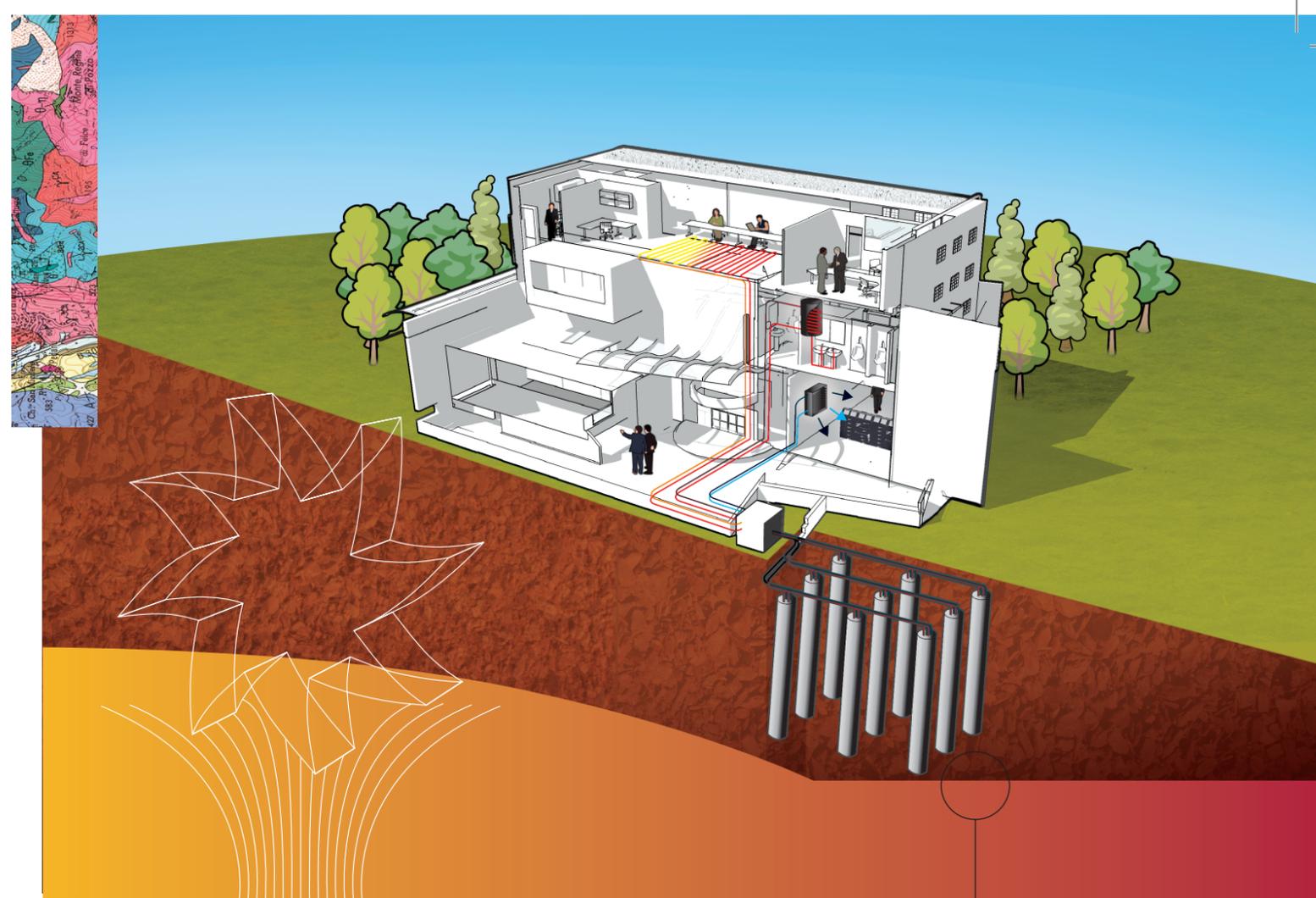


LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES SUR CHAMP DE SONDES
COLLECTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Guide technique

Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes

Manuel pour la conception et la mise en œuvre



Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes

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), Gratién 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

Illustrations : Baptiste Laurent (Bros-Communication), Olivet

Couverture : Illustration à titre indicatif (Chromatiques éditions)

Impression : BEDI OUDIN, Poitiers

ISBN : 978-2-7159-2531-1, mars 2012 – Réf. ADEME : 6660, mars 2012 – Réf. BRGM : STCo06.



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 sur champ de sondes*.

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

Les pompes à chaleur (PAC) géothermiques ont par ailleurs la particularité d'associer deux secteurs d'activité qui n'ont, *a priori*, pas de rapport direct : la géologie 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 d'autre part des bâtiments dont les besoins énergétiques sont également fixés ; les principaux éléments variant sont donc la conductivité thermique des terrains, la puissance thermique appelée et, dans le cas de bâtiments, les courbes de régulation (lois 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 géothermiques réversibles constitue une solution qu'il est important d'examiner à l'occasion de programmes neufs ou de réhabilitation.

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 p97.

Sommaire

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

- ① Le système d'échange d'énergie dans le sous-sol 9
- ② Avantages des systèmes géothermiques sur champ de sondes..... 9

Les systèmes géothermiques sur champ de sondes10

- ① Principe général..... 10
- ② Éléments constitutifs du système géothermique sur champ de sondes 10
 - 2.1 Échangeur géothermique : le champ de sondes 10
 - 2.2 Liaison entre le champ de sondes et le bâtiment.....12
 - 2.3 La pompe à chaleur 14
 - 2.4 Distribution dans le bâtiment15
- ③ Dynamique d'un champ de sondes16

Choix du système d'échange (sol ou aquifère) en fonction des caractéristiques et de l'implantation du projet 18

- ① Choix du système en fonction de la ressource exploitable (sol – aquifère).....18
- ② Choix du système en fonction des besoins énergétiques à couvrir19
- ③ Critères technico-économiques supplémentaires19
- ④ Restrictions techniques et réglementaires d'implantation de l'échangeur20
- ⑤ La maintenance20
- ⑥ Conclusion 21

Différents types d'usage et de fonctionnement de la pompe à chaleur22

- ① Une offre étendue 22
- ② Précautions d'usage..... 22
- ③ Production de chaud (chauffage) 23
- ④ Production d'eau chaude sanitaire..... 23
- ⑤ Rafraîchissement par geocooling 24
- ⑥ Production de froid (PAC réversible)..... 25
- ⑦ Production de chaud et de froid (thermofrigopompe) 25

Détermination et optimisation des besoins..... 28

- ① Détermination des besoins..... 28
 - 1.1 Eau chaude sanitaire.....29
 - 1.2 Chauffage - Déperditions statiques29
 - 1.3 Chauffage - Déperditions volumiques.....29
 - 1.4 Besoins de froid30

2	Exigences de la RT 2012	30
2.1	Coefficient Bbio	30
2.2	Caractéristiques thermiques minimales – Ponts thermiques	31
2.3	Limitations des consommations énergétiques.....	31
3	Réglementation thermique des bâtiments existants	33
4	Préconisations visant à limiter les besoins	33
4.1	Réduire les besoins de chauffage	33
5	Taux de couverture suivant la ressource accessible.....	39
5.1	Choix du taux de couverture.....	39
5.2	Réhabilitation	40
 Conception des installations de surface		41
1	Principes généraux.....	41
2	Choix des émetteurs.....	41
2.1	Émetteurs à eau (chaud et froid)	41
2.2	Émetteurs à air.....	42
3	Distribution dans le bâtiment.....	44
4	Régulation de l'émission	44
4.1	Lois de régulation dites lois d'eau.....	44
4.2	La régulation en pratique.....	45
5	Gestion de la circulation dans le champ de sondes.....	46
5.1	Puissance et débit	46
5.2	Principes de la régulation côté sondes.....	47
5.3	Quand utiliser la régulation ?.....	48
6	Simulation thermique dynamique.....	50
6.1	Simulation thermique dynamique du bâtiment	50
6.2	Simulation thermique dynamique du champ de sondes et plate-forme.....	52
 Caractéristiques du sous-sol.....		53
1	Paramètres liés à la géologie	53
2	Transfert de chaleur	53
3	Paramètres physiques liés aux terrains	56
3.1	La conductivité thermique.....	56
3.2	La capacité calorifique	57
3.3	Influence de la présence d'un aquifère	58
4	Bilan énergétique du sol	58
5	Interactions thermiques entre sondes.....	59

Dimensionnement d'une solution PAC sur champ de sondes 61

1	Principes généraux de dimensionnement	61
2	Paramètres à prendre en compte.....	61
	2.1 Nature du sous-sol	62
	2.2 Contraintes physiques.....	62
	2.3 Contraintes imposées par le bâtiment.....	62
	2.4 Choix techniques.....	62
	2.5 Principes de la simulation dynamique.....	62
	2.6 Résultat de STD : l'équilibre du système.....	63
	2.7 Résultat de STD : les régimes de fonctionnement.....	65
	2.8 Résultat de STD : la performance	65
3	Logiciels de dimensionnement de l'échangeur géothermique.....	65

Mise en œuvre d'une solution PAC sur champ de sondes..... 66

1	Configuration générale des ouvrages	66
2	Programme de forage et acquisition de données.....	66
3	Analyse géophysique sur site	67
4	Test de réponse thermique	67
	4.1 Principe.....	68
	4.2 Méthodologie.....	69
	4.3 Détermination de la conductivité.....	70
	4.4 Détermination de la résistance thermique de la sonde	70
5	Acquisition des données thermiques <i>in situ</i>	71
6	Installation des boucles de sondes	72
7	Cimentation des boucles de sondes	74
8	Essais de mise en pression	76
9	Raccordements et régulation	77
10	Procès-verbal de réception de l'ouvrage.....	77
11	Mise en exploitation, contrôle du bon fonctionnement.....	77

Exploitation, suivi et maintenance 77

1	Surveillance et entretien des installations de surface	77
2	Surveillance et entretien du champ de sondes	78

Réglementation applicable à la réalisation de champ de sondes..... 79

1	Le code minier	79
2	Le code civil.....	79

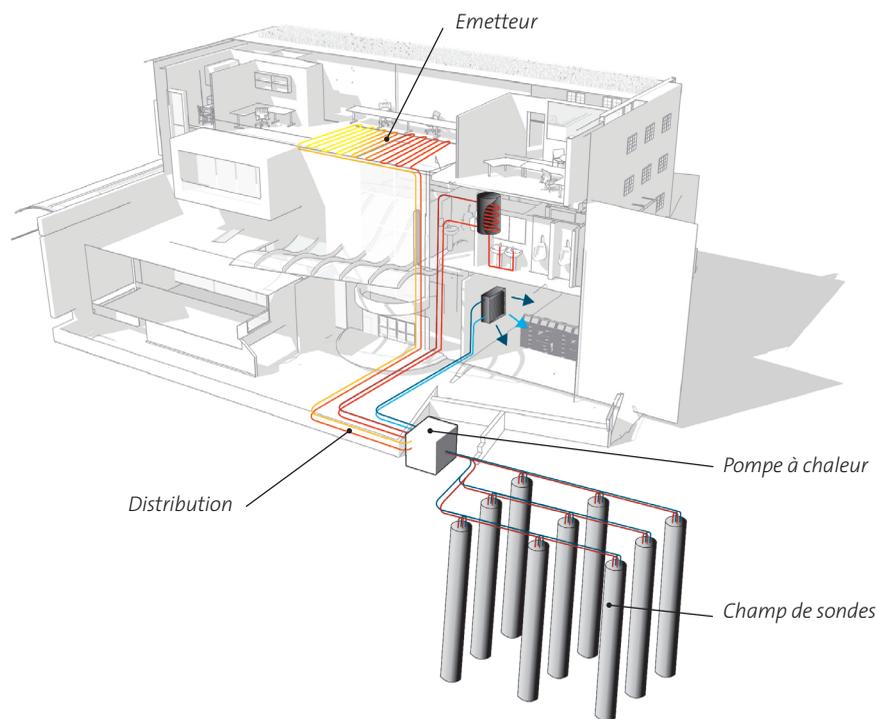
Mécanismes d’accompagnement et procédures incitatives	81
① Le crédit d’impôt	81
② Le Fonds chaleur	81
③ Certificats d’économie d’énergie	82
Aspects économiques	83
① Champ de sondes	83
1.1 Études et maîtrise d’œuvre	83
1.2 Réalisation du champ de sondes.....	83
1.3 Équipements et raccordement du champ de sondes.....	83
1.4 Maintenance.....	84
② Équipements de surface.....	84
2.1 Investissements.....	84
Aspects environnementaux	85
① L’énergie du sous-sol : une énergie renouvelable	85
② Émissions de CO₂	85
③ Taux d’émission	85
④ Impact des fluides (installations géothermiques)	85
4.1 Fluides frigorigènes (PAC).....	85
4.2 Fluides caloporteurs (champ de sondes).....	86
Domaines d’applications appropriés	87
① Principes généraux – Choix du système	87
② Retours d’expériences.....	88
Points à retenir pour l’installation d’une PAC géothermique sur champ de sondes	91
Annexes	92
① Déroulement d’une opération de pompe à chaleur géothermique sur champ de sondes	92
② Dimensionnement d’une opération sur champ de sondes – Aide à la décision.....	93
③ Valeurs de conductivités thermiques en fonction du type de roche (source SIA 384/6) ..	94
Pour en savoir plus	95
Lexique	97
Bibliographie	102

Présentation synthétique d'un système type pour une opération de géothermie sur champ de sondes*

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 champ de sondes, composé de plusieurs sondes géothermiques verticales ;
- d'une pompe à chaleur (PAC) ;
- d'un système de distribution et d'émission d'énergie dans les locaux.

Principaux éléments du système géothermique sur champ de sondes.



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 eau de nappe (ou sur aquifère*)¹ ;
- les systèmes sur sol : c'est ce système qui est détaillé dans le présent manuel, en particulier les systèmes d'échange d'énergie sur champ de sondes géothermiques verticales (CSGV).

② Avantages des systèmes géothermiques sur champ de sondes

Les principaux avantages des systèmes géothermiques sur champ de sondes sont :

- leur stabilité en termes de rendement :
 - lorsqu'ils sont correctement dimensionnés, les systèmes géothermiques sur sondes sont plus performants que les systèmes aérothermiques, du fait des variations moindres de la température de la source d'énergie utilisée (température du sol 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 freecooling.

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

Les systèmes géothermiques sur champ de sondes

1 Principe général

La géothermie sur champ de sondes consiste à faire circuler, en circuit fermé, un liquide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) dans plusieurs sondes verticales, constituées par un réseau de tubes en résine disposés à la verticale dans des forages, afin d'échanger l'énergie (par simple transfert de chaleur) et de l'acheminer jusqu'à la pompe à chaleur*.

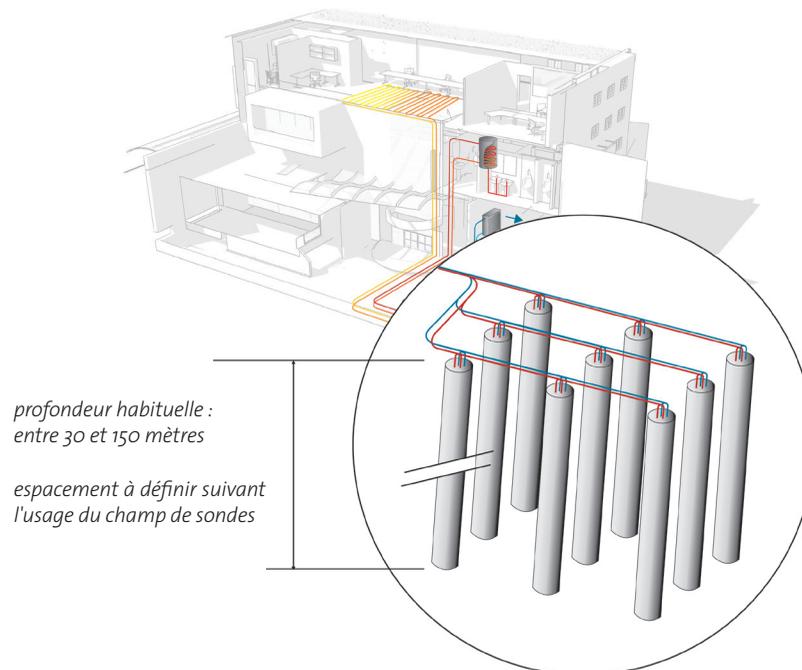
En surface, une ou plusieurs pompes à chaleur permettent de transférer les calories puisées dans le sol vers le bâtiment à chauffer (mode chauffage) ou d'injecter les calories en provenance du bâtiment vers le sol (mode refroidissement). Le champ de sondes peut également être utilisé comme source de rafraîchissement pour le bâtiment, qui l'exploite alors sans avoir recours aux pompes à chaleur (geocooling).

À l'inverse des solutions sur aquifère, les systèmes sur champ de sondes sont adaptés à la grande majorité des configurations géologiques, indépendamment des ressources disponibles en eau souterraine à l'aplomb du projet.

2 Éléments constitutifs du système géothermique sur champ de sondes

2.1 Échangeur géothermique : le champ de sondes

Schéma conceptuel simplifié du champ de sondes.

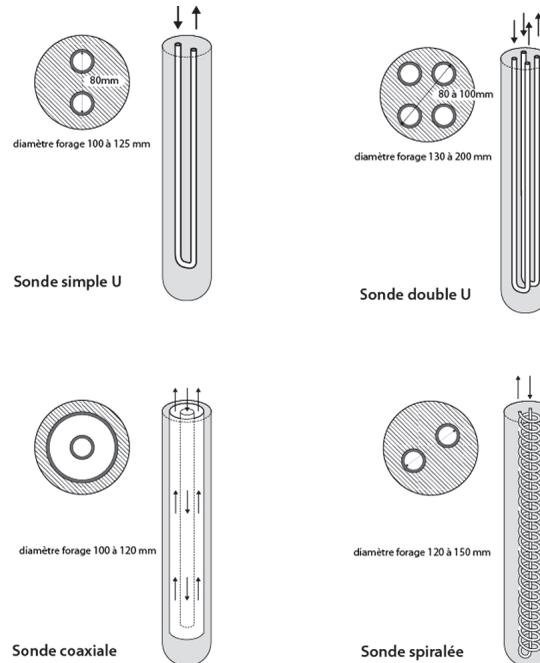


Un champ de sondes, selon la définition de la NF X10-970² est constitué par un ensemble de sondes géothermiques verticales (généralement supérieur à cinq sondes), de profondeurs comprises généralement entre 30 et 150 mètres (mais pouvant atteindre des profondeurs plus importantes), disposées en dessous ou au voisinage d'un bâtiment à chauffer ou à rafraîchir. Le nombre, l'espacement et la profondeur des sondes sont dimensionnés par le bureau d'étude et dépendent de plusieurs facteurs qui sont propres à l'utilisation du bâtiment. Les conduites de chaque sonde se rejoignent à un ou plusieurs collecteur(s) qui alimente(nt) une ou plusieurs pompes à chaleur.

La disposition des sondes est généralement quadratique ou en quinconce, leur raccordement peut être réalisé en série ou en parallèle. Outre leur profondeur, un paramètre essentiel est la distance entre les sondes qui peut varier, selon le dimensionnement de l'installation et l'usage du champ de sondes. L'espacement minimum entre les sondes est contraint par la faisabilité du forage, qui doit éviter de télescoper deux sondes (déviation du forage avec la profondeur). L'espacement maximal sera limité par l'espace disponible sur la parcelle, mais également par les différents paramètres de dimensionnement (stockage).

Chaque sonde est constituée par une ou plusieurs boucles (généralement du polyéthylène haute densité – PEHD 100), de diamètre compris entre 20 et 40 mm (généralement 32 mm) dans lequel circule, en circuit fermé, un liquide caloporteur (généralement du monopropylène glycol). La boucle³ de sonde est placée dans un forage de 125 à 200 mm de diamètre et rempli par un ciment spécialement conçu pour les opérations de géothermie (conductivité thermique optimisée).

Configurations et géométries possibles, pour les sondes géothermiques verticales.



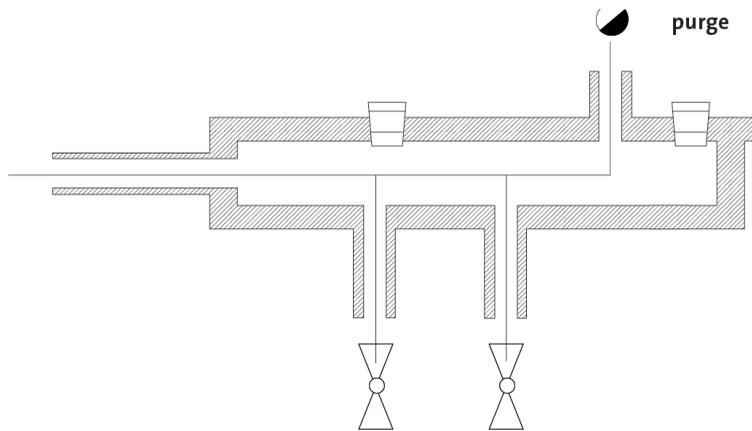
2 – NF X10-970 : forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale* (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) – Réalisation, mise en oeuvre, entretien, abandon (janvier 2011).

3 – Norme PR NF X10-960.

2.2 Liaison entre le champ de sondes et le bâtiment

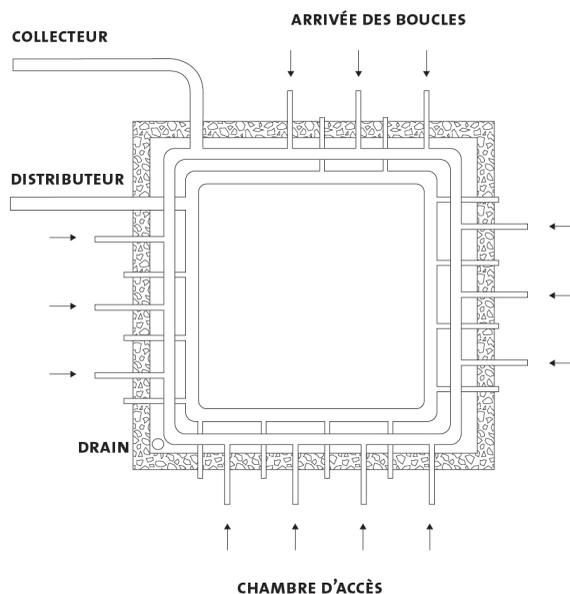
Les sondes sont généralement reliées entre elles et avec le bâtiment par des linéaires de tuyaux, généralement en PEHD, installés en tranchées, puis recouverts de terre compactée à environ 1,5 mètre de profondeur du sol fini (hors gel). Les sondes peuvent être reliées en parallèle ou en série directement dans le local technique ou dans une chambre d'accès si la distance du champ de sondes au bâtiment est trop importante. Les circuits sont alimentés par plusieurs nourrices (distributeur et collecteur). Les nourrices sont équipées de vannes d'isolation sur chaque circuit et d'une vanne de purge pour l'air. Un filtre en sortie de champ de sondes permet la récupération des débris éventuels. Enfin, des vannes d'équilibrage permettent de distribuer uniformément le débit du fluide dans chacun des circuits, ceci afin d'assurer une bonne répartition de l'échange thermique.

Distributeur et collecteur.



Robinet avec distributeur à billes

Schéma et photo de nourrice dans chambre d'accès.

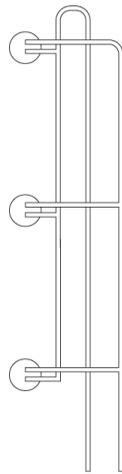


© Qualiforage - Boudot 2008

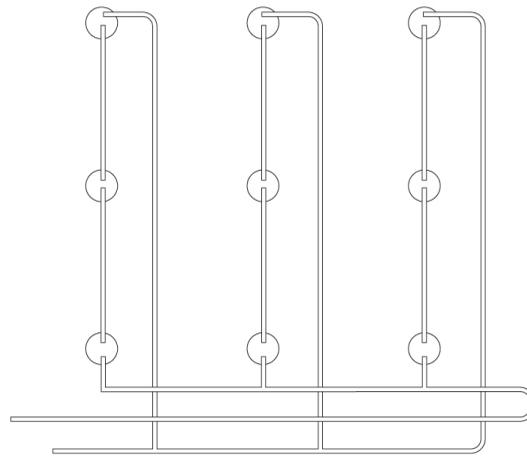
• Recommandations pour la distribution entre sondes

Afin de limiter la consommation des pompes de circulation, il est recommandé d'optimiser la distribution entre les sondes. Le circuit de connexion entre les sondes peut être monté en parallèle ou en série, ou en combinaison avec par exemple des groupes de 3-4 sondes en série qui sont ensuite montées en parallèle.

Schémas simplifiés de connexion des sondes au circuit de distribution, montage en boucle de Tickelman.



sondes en parallèle



sondes en série

Le montage en parallèle est le plus simple à mettre en œuvre et limite les pertes de charges dans le système. Lorsque le nombre de sondes devient important, un montage en boucle de Tickelman devient nécessaire pour faciliter l'équilibrage des débits dans les sondes.

Augmenter le nombre de sondes en série augmente les pertes de charge, mais permet de diminuer la taille des nourrices et donc le coût du système.

Le montage en série doit prévoir le by-pass de chaque sonde afin qu'une éventuelle fuite intervenant sur l'une d'entre elles n'affecte pas l'utilisation des autres sondes dans la série.

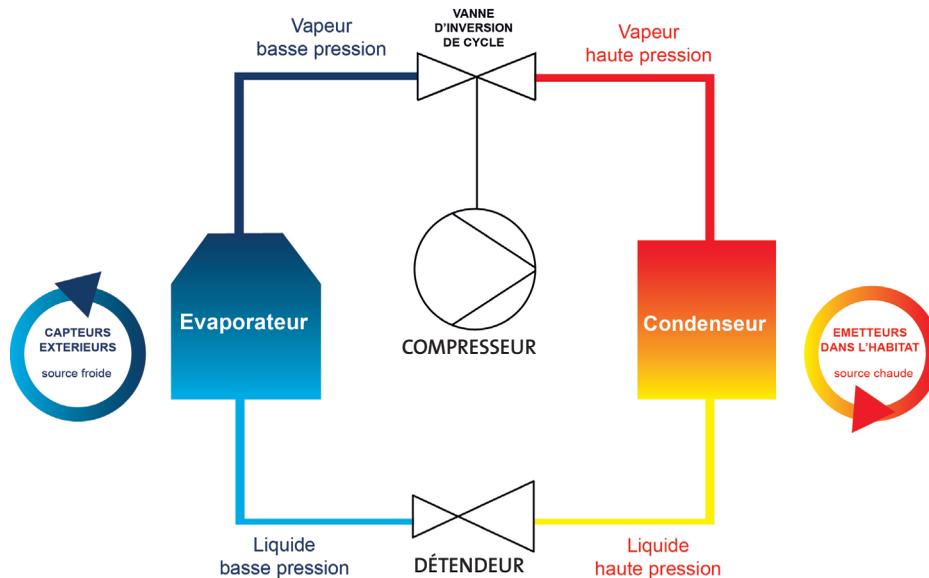
La distribution mise en œuvre devra permettre la fermeture des portions de collecteur géothermique lorsque les demandes de chaud ou de froid sont minimales.

2.3 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 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 (champ de sondes). 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.

2.4 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.

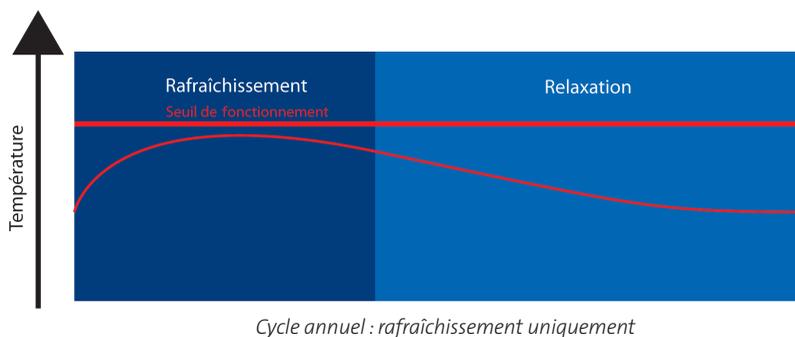
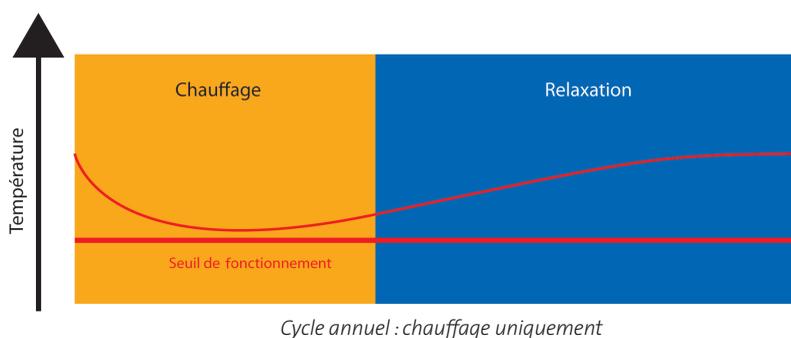
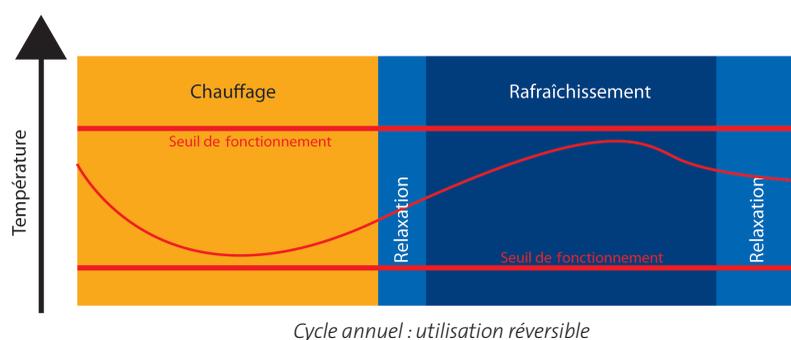
Lorsqu'un circuit de distribution est utilisé pour mutualiser le fonctionnement en mode chauffage et le fonctionnement en mode rafraîchissement (activés indépendamment l'un de l'autre), les composants qui sont utilisés en commun pour les deux modes (émetteurs, échangeurs, etc.) doivent être compatibles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

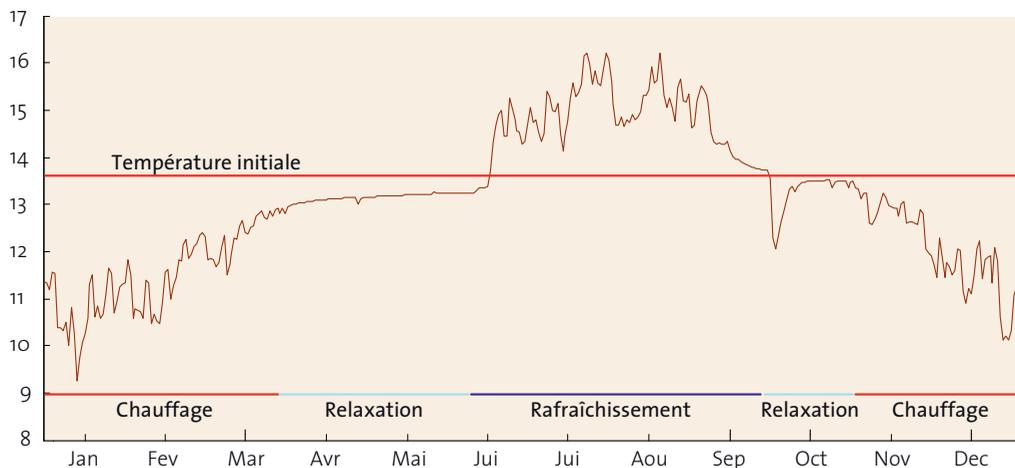
3 Dynamique d'un champ de sondes

Les besoins exprimés par le bâtiment en chauffage ou en rafraîchissement, que ce soit par l'intermédiaire de la pompe à chaleur ou par geocooling, se traduisent par des appels de puissance thermique sur les sondes. Ceux-ci sont appliqués au sous-sol par échange thermique à travers les sondes : la température du sol dans et à proximité du champ de sondes évolue donc sous l'influence des besoins thermiques du bâtiment.

De plus, ces besoins variant généralement au fil de la saison, la température du champ de sondes varie en parallèle. Ainsi, l'état du champ de sondes évolue dynamiquement sur un cycle annuel. Les figures suivantes montrent l'évolution de la température moyenne du champ de sondes sur un an, pour trois cas d'utilisation.



À titre d'exemple, la figure suivante montre l'évolution de la température moyenne du sol à proximité des sondes (champ de 20 sondes) sur un cycle saisonnier.



En fonction de la taille du champ de sondes et des besoins thermiques soutirés par le bâtiment, la température du champ de sondes sur un cycle annuel peut :

- soit retrouver sa valeur initiale : dans ce cas, les saisons s'enchaînent les unes après les autres et le système jouit d'une grande stabilité en terme de performance ;
- soit être inférieure à sa valeur initiale : ce cas traduit une utilisation en mode chauffage trop conséquente pour la taille du champ de sondes considéré. L'enchaînement des saisons présente une dérive à la baisse de la température du sol ;
- soit être supérieure à sa valeur initiale : ce cas traduit une utilisation en mode rafraîchissement trop conséquente pour la taille du champ de sondes considéré. L'enchaînement des saisons présente une dérive à la hausse de la température du sol.

Les trois cas précédents peuvent être tolérés dans certaines limites. Le rôle du dimensionnement est de s'assurer que ces limites soient respectées et permettent un fonctionnement performant et pérenne du champ de sondes vis-à-vis des besoins finaux du bâtiment.

Cependant, un système géothermique **utilisé en chauffage uniquement ou en rafraîchissement uniquement** nécessite, sauf cas exceptionnel, une période de relaxation annuelle pendant laquelle le système est arrêté, dont la durée dépend du bâtiment. Dans certains cas, les contraintes physiques ne permettent pas à la période de relaxation de reconstituer le capital énergétique du sous-sol : l'emploi de la géothermie seule (c'est-à-dire, sans recharge contrôlée ou sans appoint) n'est alors pas envisageable.

Un système géothermique ne peut donc pas être utilisé en chauffage ou en rafraîchissement en permanence (i.e. 7j/7), à moins que le sous-sol soit alimenté en permanence par un flux d'énergie suffisant (flux géothermique important, nappe très active...).

Les systèmes réversibles qui sont équilibrés sur l'année en injection/prélèvement de chaleur dans le sol ne nécessitent donc pas de période de relaxation et peuvent produire ainsi toute l'année. Pour des raisons évidentes de rentabilité, on cherche donc autant que possible à mettre en œuvre des systèmes réversibles plutôt que des systèmes à une seule fonction de chauffage ou de rafraîchissement.

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 **vérifier⁴ *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 permet de caractériser les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, rabattement).

4 – 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 m 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 frigorifique⁵ de 70 kW ($\Delta T = 6 \text{ °C}$), soit une puissance calorifique de 100 kW (COP⁷ 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 hydrodynamiques 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 m), 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 qui va influencer le nombre et la profondeur des sondes. Le test de réponse thermique permet alors 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.

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

6 – 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.

7 – 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 (interaction 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)⁸.

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.

⁸ – 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 en amont du projet pour permettre l'équipement du forage en sonde avant la phase d'équipement en forage d'eau (tubes crépinés + 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 standards, 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 six 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 dommage (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 sondes 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. Avec une différence de température entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur fixé généralement à 5 °C, le régime peut ainsi varier, par exemple, entre 14 °C/9 °C (début de la saison de chauffage) et 3 °C/-2 °C (fin de la saison de chauffage).

La connaissance de la variation du régime de température dans les sondes, ainsi qu'à l'évaporateur, permet alors de statuer sur la nécessité ou non d'employer de l'antigel dans les sondes et de déterminer finement la performance (COP) de l'installation.

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 **Rafrâichissement* 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**. 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 du sous-sol 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 (PAC réversible)

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.

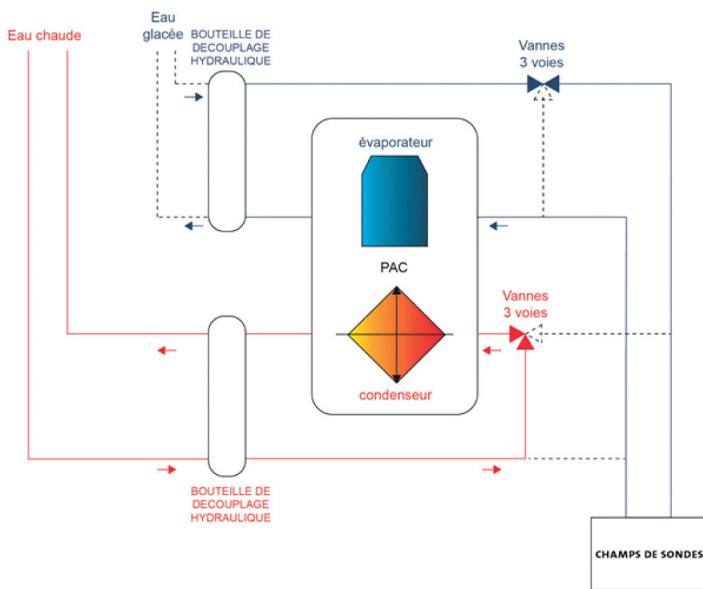
Une pompe à chaleur **réversible** assure suivant les besoins de la production de chaleur et de la production de froid. Pour cela, il convient d'inverser le cycle du fluide frigorigène en installant sur le circuit frigorifique une vanne d'inversion de cycle (4 voies). Le condenseur devient ainsi évaporateur 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 du champ de sondes 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 « thermofrigopompe ». Elle peut être valorisée par la mise en œuvre de réseaux de distribution d'eau chaude et d'eau glacée alimentant les différents systèmes de traitement (centrale de traitement d'air, plancher rayonnant, appareils terminaux...) 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 (champ de sondes).

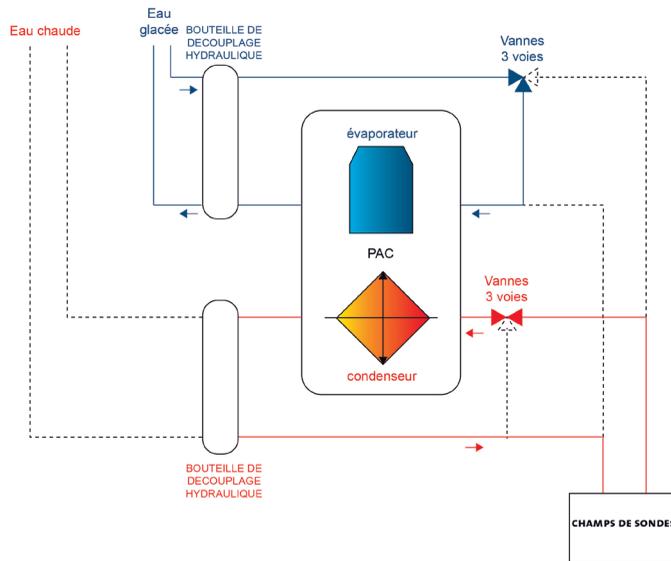
En fonction des besoins à satisfaire, cinq schémas de fonctionnement peuvent être envisagés (les parties du système non-utilisées dans chaque cas de fonctionnement sont représentées en pointillés noirs).

Schéma chaud seulement.



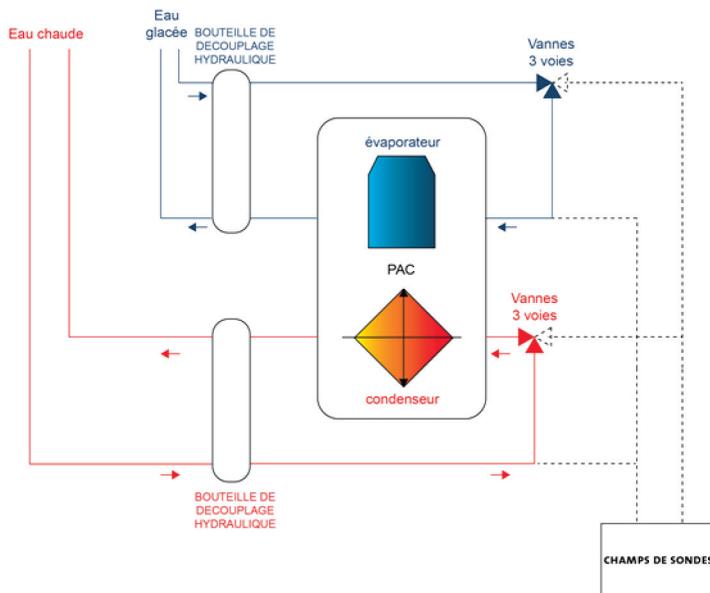
La chaleur prélevée au sous-sol (via l'évaporateur) est transférée via le condenseur au milieu à chauffer.

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



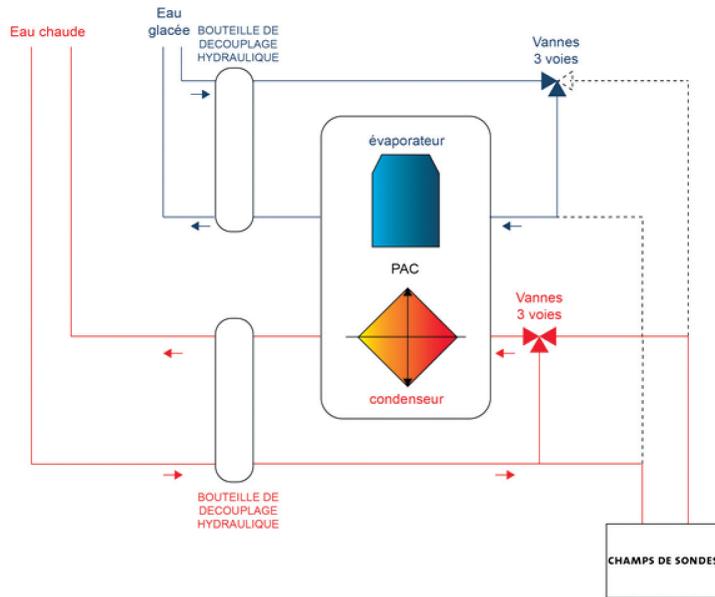
Le froid produit est excédentaire, une partie est réinjectée dans le sous-sol.

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



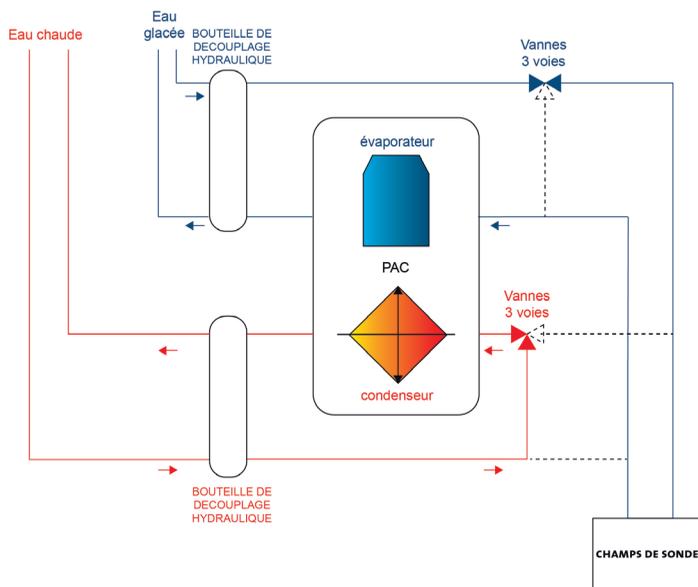
L'équilibre entre chaud et froid étant réalisé, le champ de sondes n'est pas utilisé.

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



L'excédent de chaud est réinjecté dans le sous-sol.

Schéma froid seulement.



La chaleur évacuée des locaux est transférée au sous-sol 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, bureaux 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 RT2012 a pour objectif de réduire la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs en moyenne à $50 \text{ kWh}_{EP} / \text{m}^2_{SHONRT} \text{ an.}^9$

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. Elles s'appliquent 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 RT2005, 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 RT2005.

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.

9 – 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.

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).

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}^{10} 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 l' U_{bat} qui doit être inférieure à l' $U_{\text{bat}}^{\text{ref}}$, 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

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

¹⁰ – Voir arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux.

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.

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 × surface vitrée × g EN140 (facteur solaire du vitrage + stores) pour chaque orientation

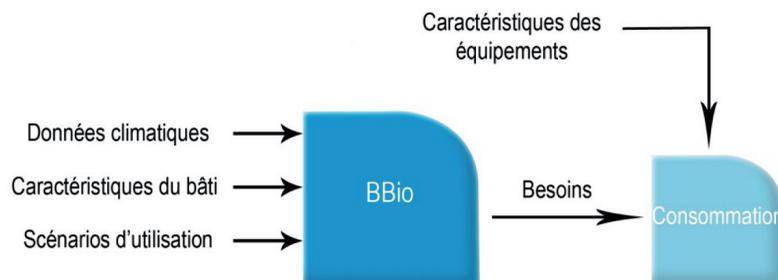
Apports statiques = U_{bat} × surfaces totales déperditives × $(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$ en W

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 RT2005 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 permettre de « 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 $Bbio_{max}$, défini comme suit :

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

Avec :

- $Bbio_{maxmoyen}$: valeur moyenne du $Bbio_{max}$ définie par type d'occupation du bâtiment ou de la partie de bâtiment et par catégorie CE1/CE2 ;
- **Mbgéo** : coefficient de modulation selon la localisation géographique ;
- **Mbalt** : coefficient de modulation selon l'altitude ;
- **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 :

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

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

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

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 kWh_{ep}/m²_{SHONRT.an}¹¹.

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 :

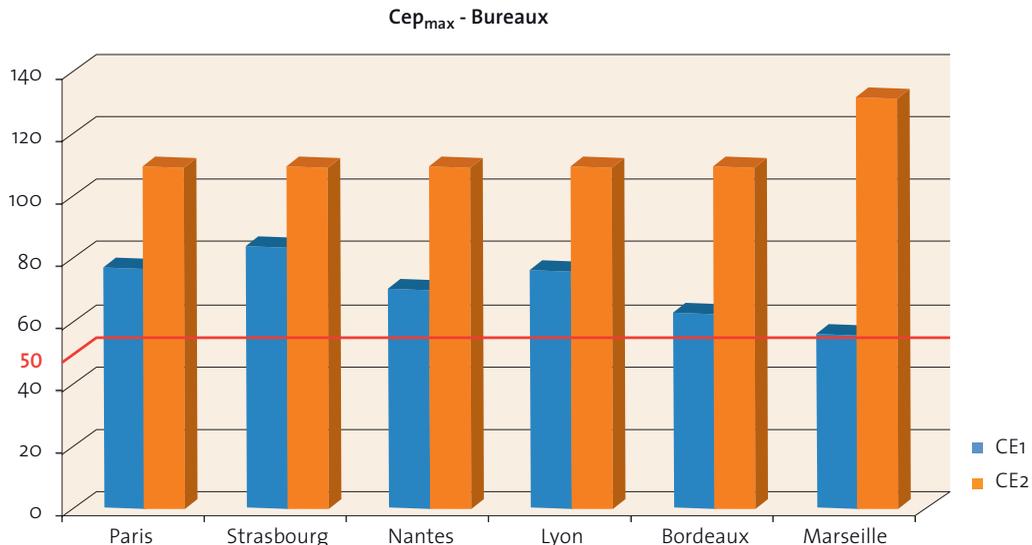
$$\text{Cep}_{\text{max}} = 50 \times \text{Mctype} \times (\text{Mcgeo} + \text{Mcalt} + \text{Mcsurf} + \text{McGES}) \text{ (Usage autre qu'habitation)}$$

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

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.



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.

¹¹ – 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.

La plupart du temps les bureaux sont en catégorie 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)
	$Cep_{ffi} 50 \times (a + b) \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHON.an}$ (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 ¹²	U
Murs extérieurs	200 mm de laine de roche extérieure	$0,20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Toiture 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	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ $U_w = 1,8$

¹² – 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 :

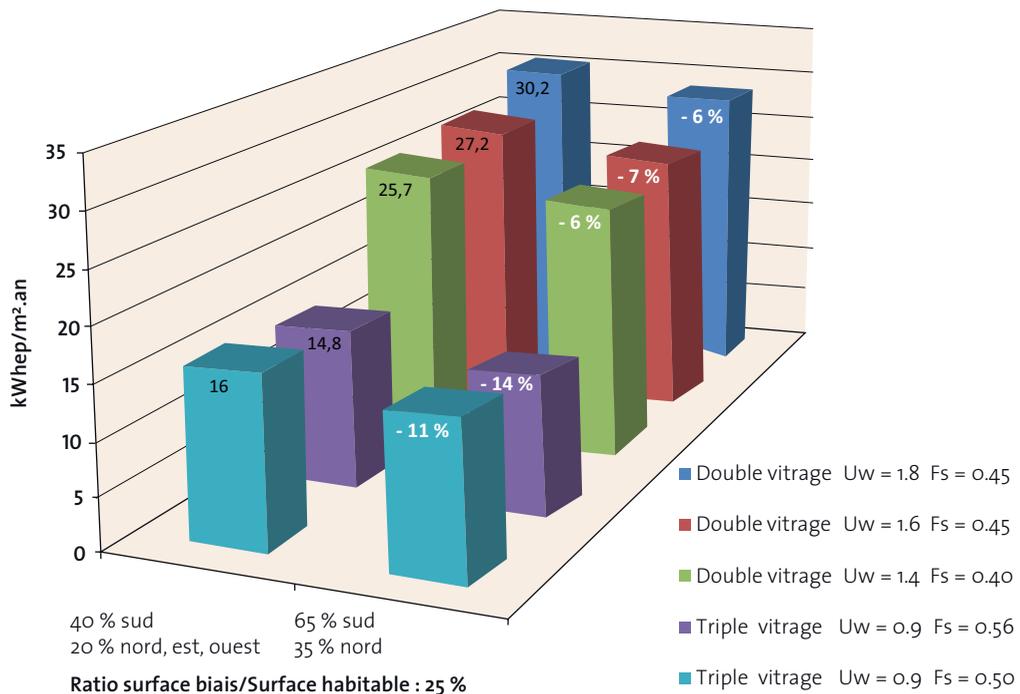
- isolation extérieure/béton/isolation intérieure ;
- maçonnerie isolante (brique monomur/béton cellulaire) + isolation intérieure.

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 imposent 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 :

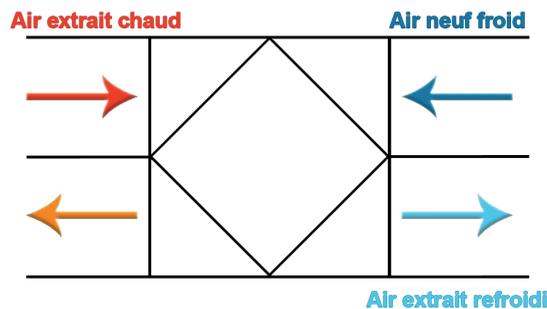


Cette préconisation doit s'accompagner de dispositif de protection solaire performant pour l'été.

• 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 permet 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 36m³/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.

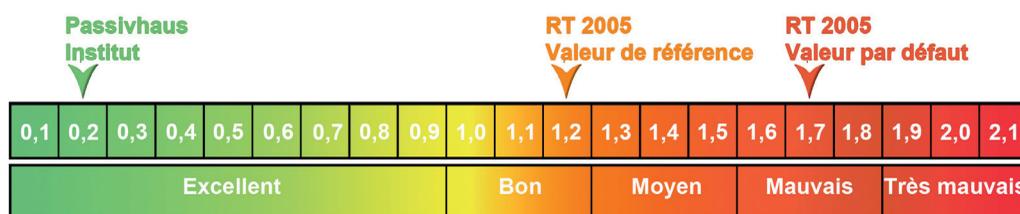
• Étanchéité à l'air

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_{13} , 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 de 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 $1,6W/m^2/100$ 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.

• 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.

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

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 fait 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 voire 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

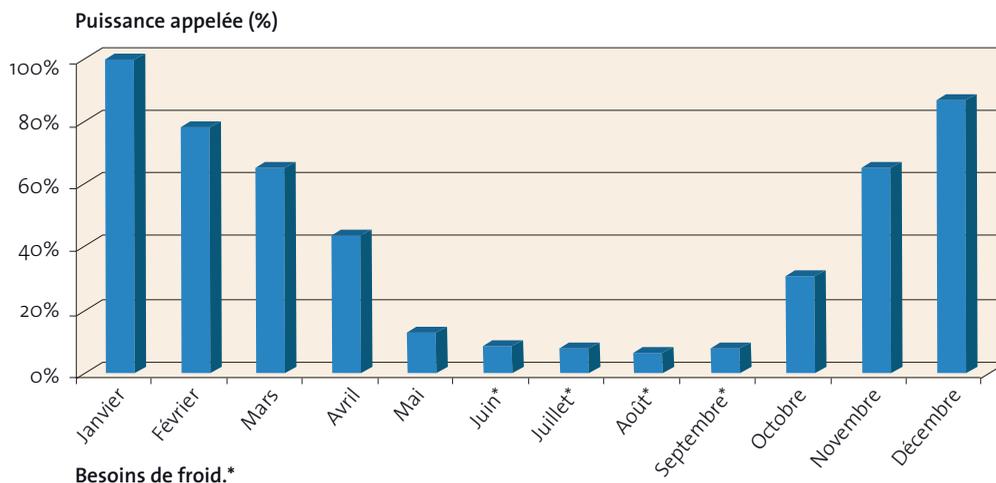
Elle peut être réalisée de façon naturelle ou mécanique :

- **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

5.1 Choix du taux de couverture

Courbe monotone de la puissance appelée sur une année.



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'ECS n'est pas représentée sur la graphique. La puissance est plus ou moins constante toute l'année.

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 de 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 de 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.

Dans un projet où les besoins de chaud sont dominants, si la puissance crête d'hiver est utilisée comme base de dimensionnement du champ de sondes, il est possible de réévaluer la performance de climatisation rafraîchissement atures plus proches de celles du système donnent un rendement plus élevé qui peut servir à compenser une partie du coût plus élevé de l'investissement.

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

Il faut noter qu'un déséquilibre de la consommation de chaud ou de froid peut conduire à une augmentation de la température du sol donc une diminution de la performance à long terme. Pour éviter le problème, le système géothermique peut être dimensionné sur la consommation la plus petite et la mise en place d'un système de rejet de chaud (tour de refroidissement) ou de production de chaud (panneaux solaires) pour couvrir le reste des besoins permettent de contrôler l'impact sur la température du sol.

5.2 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 existant conservés peut permettre de se satisfaire d'une ressource (« puissance disponible » de la sonde, taille du terrain disponible) 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 (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 1.

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 pour 30 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 courants 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

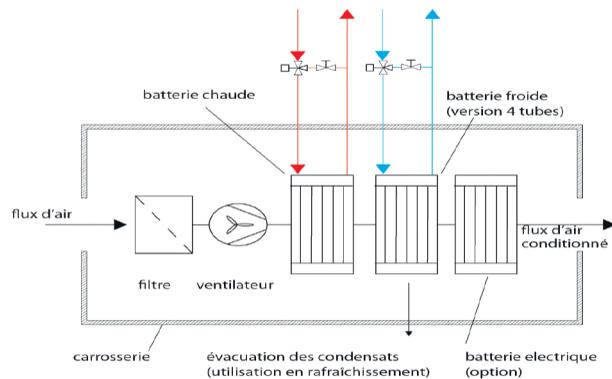
Les systèmes aérauliques sont bien adaptés au chauffage des bâtiments ayant des émetteurs de chaleur inadaptés (haute température), des systèmes de refroidissement anciens ou des grands volumes. Ils permettent à la fois la ventilation, le filtrage de l'air et un renouvellement d'air précis et simple.

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 » : appareil équipé d'une batterie électrique ;
- ventilo-convecteur « 4 tubes » : l'appareil comporte deux 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 de l'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 du champ de sondes 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 champ de sondes 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 champ de sondes alimente une boucle sur laquelle sont reliées autant de PAC de petite capacité que de zones à traiter.

Alternativement, il peut être envisagé de répartir les sondes 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 d'habitats individuels ou petits collectifs). Dans ces cas, en fonction de la proximité relative des champs de sondes privatifs, il est nécessaire de considérer les interactions thermiques mutuelles qui peuvent se développer. De ce fait l'ensemble des champs de sondes privatifs présente les mêmes caractéristiques qu'un seul champ de sondes les regroupant.

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).

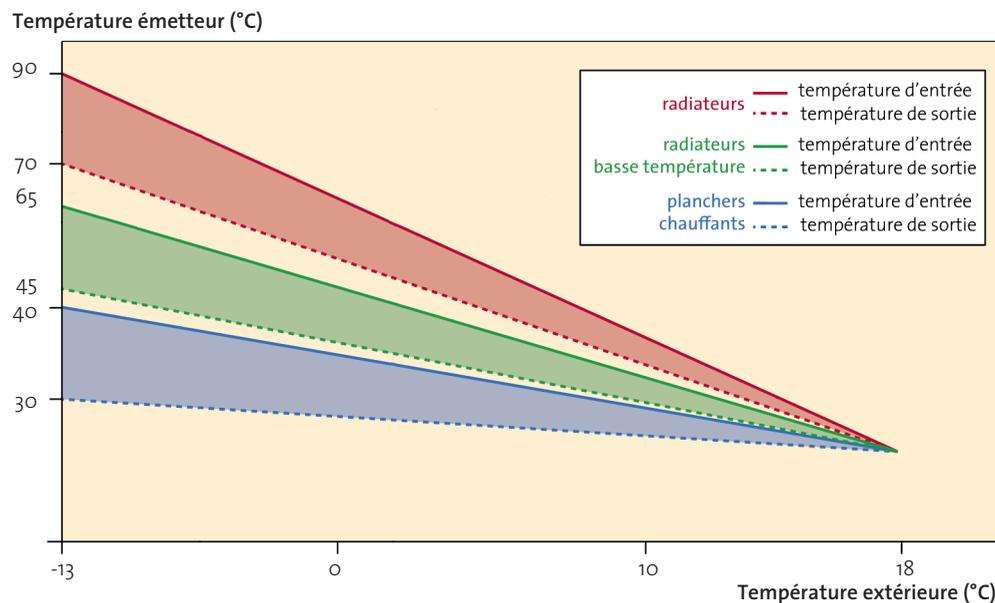
4 Régulation de l'émission

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 réseau hydraulique circulant dans l'échangeur géothermique peut se faire de façon à garder une température constante dans le système ou de façon à garder un débit constant dans les échangeurs. Pour diminuer les consommations de circulation et dans le cas d'un raccordement

en série, l'échangeur géothermique peut être mis œuvre de façon à permettre la mise en route en cascade de portions d'échangeur géothermique.



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'actionneurs (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 Gestion de la circulation dans le champ de sondes

La puissance consommée par les pompes de circulation est proportionnelle au cube du débit ! Il est donc avantageux, afin de maximiser les performances de l'installation, de fonctionner avec les débits les plus faibles possible dans les sondes à tout instant.

5.1 Puissance et débit

La puissance instantanée du champ de sondes appelée par l'installation de production est donnée par la relation :

$$P = Q \times C_{pf} \times \Delta T$$

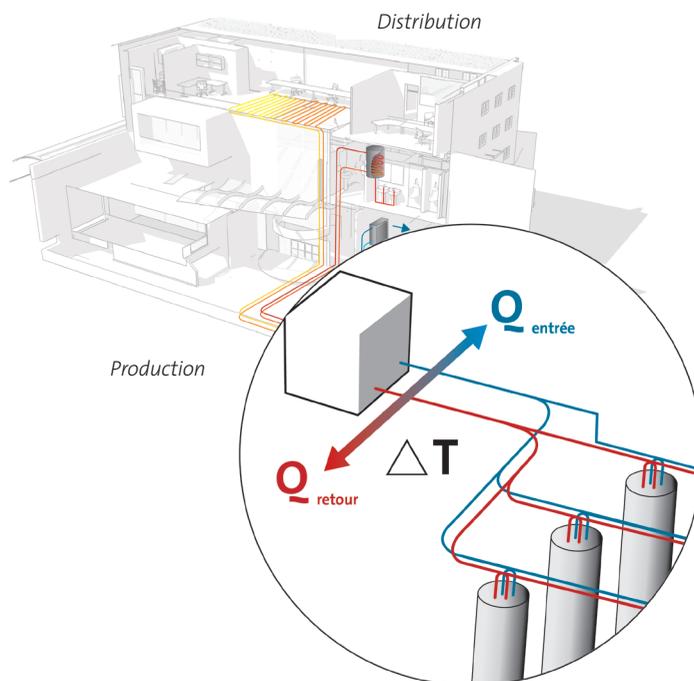
avec :

Q débit massique du fluide caloporteur circulant dans l'échangeur ou le champ de sondes (kg/s).

C_{pf} la chaleur spécifique (ou capacité thermique) du fluide caloporteur (J/kg.K).

ΔT la différence de température (°C) entre la sortie T_s et l'entrée T_e de l'échangeur (ΔT = T_s - T_e).

Paramètres de la puissance fournie par le champ de sondes.



La puissance est distribuée sur l'ensemble du linéaire de sondes. Dès lors que les pertes de charges dans le circuit sont équilibrées, les débits circulant en tout point du circuit (i.e. dans chaque sonde) sont identiques : la puissance est alors uniformément répartie sur le linéaire, d'où la notion de puissance linéique (puissance appliquée par mètre linéaire de sonde en W/m).

Pour une même puissance, plus la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'installation géothermique est élevée, plus le débit nécessaire est faible. Dans la pratique, on cherchera donc à maximiser ΔT, tout en garantissant un régime turbulent et dans les limites acceptées par la PAC, afin de minimiser la puissance des pompes de circulation et leur consommation électrique, améliorant ainsi le COP de l'installation.

• Utilisation de pompes à chaleur

Une pompe à chaleur n'impose pas directement les températures effectives en entrée et sortie de l'installation géothermique. Elle adapte uniquement la température d'entrée du champ de sondes en fonction de la température de sortie du champ de sondes. Pour un débit donné, la différence ΔT appliquée par la PAC dépend de la puissance instantanée de celle-ci. La température de sortie du champ de sondes évolue quant à elle en fonction de l'état interne du système géothermique.

• Utilisation en mode geocooling ou free cooling

Dans les modes geocooling ou free cooling, le transfert de calories entre le bâtiment et le sous-sol est direct, et n'utilise pas de cycle thermodynamique. La température d'entrée est généralement imposée par le bâtiment et la sortie évolue en fonction de l'état interne du système géothermique. Pour une même puissance et un même écart de température ΔT , le débit nécessaire sera d'autant plus faible que la chaleur spécifique du fluide sera élevée. En pratique, on favorisera autant que possible les régimes de températures strictement positifs afin de minimiser l'emploi de glycol ou autre antigel dans le fluide caloporteur.

Dans le cas où le fluide caloporteur utilisé n'est pas de l'eau, il est nécessaire, lors de la réalisation, de vérifier que les données du fabricant sont en adéquation avec les débits de circulation qui seront utilisés afin de fournir la puissance prévue.

5.2 Principes de la régulation côté sondes

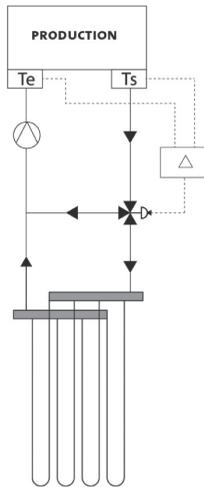
Dans la pratique, on utilise deux types de régulation : la régulation en température et la régulation en débit.

Régulation en température : en fonction de la température de sortie de la production T_p , on agit sur l'ouverture de la vanne trois voies afin de réguler la température de retour T_e . Une partie du fluide en sortie de la production est injectée dans les sondes, la régulation agissant sur la température du mélange obtenu. On peut ainsi contrôler le ΔT entre l'entrée et la sortie de la production, ou réguler la température de retour vers la production.

Note : la pompe peut être à vitesse variable pour s'adapter à la charge de la production.

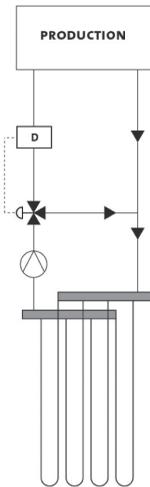
Régulation en débit : la vitesse de circulation du fluide dans l'installation de production est variable (pompe à vitesse variable ou vanne bypass trois voies) et ΔT est arbitrairement fixé. De manière préférentielle, on utilise une pompe à vitesse variable plutôt qu'une vanne trois voies dans ce cas de figure.

RÉGULATION EN TEMPÉRATURE

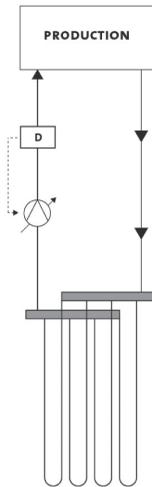


RÉGULATION EN DÉBIT

par vanne 3 voies



par vitesse variable



Note : les schémas précédents peuvent se décliner techniquement par l'utilisation d'autres moyens potentiellement plus efficaces, comme par exemple la déconnexion hydraulique entre le circuit de production et le circuit sondes, ou l'introduction d'un échangeur thermique entre les deux (ce qui nécessite de doubler les organes de pompage). Dans ce dernier cas, il est alors possible de différencier la nature des fluides circulants dans le circuit de production et dans les sondes.

5.3 Quand utiliser la régulation ?

• Pompe à chaleur* en mode chauffage

En mode chauffage, le débit dans les sondes et dans l'évaporateur est adapté en permanence (régulation en débit), en fonction de la puissance instantanée, pour assurer une différence de température constante ΔT entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur. On choisit alors ΔT en fonction des caractéristiques de la PAC (typiquement $\Delta T = 5^\circ\text{C}$).

- Lorsque la PAC fonctionne en tout-ou-rien (un seul étage de compression, pas de régulation continue), il est également possible de fonctionner à débit fixe chaque fois que la PAC est activée. Dans ce cas, il est nécessaire de vérifier que le ΔT résultant, variable, sera compatible sur toute la plage d'utilisation de la PAC : si tel n'est pas le cas, la régulation de débit variable est nécessaire.
- Lorsque la PAC est à régulation discrète (plusieurs étages de compression, pas de régulation continue), le débit peut être prédéterminé par paliers (autant de paliers que d'étages de compression), les paliers étant enclenchés en fonction du nombre de compresseur activés. Ce mode peut être satisfaisant (extensions du mode précédent) et évite une régulation évoluée du débit. Les mêmes précautions concernant le ΔT résultant, variable sur chaque palier, doivent être prises.
- Lorsque la PAC est à régulation continue, le débit doit s'adapter à la puissance instantanée afin de maintenir un ΔT constant, ce qui nécessite d'introduire des capteurs de température et la logique nécessaire à la régulation

Note : la régulation du mode chauffage et les composants nécessaires peuvent être ou non intégrés à la PAC en fonction de ses caractéristiques techniques.

• Pompe à chaleur en mode refroidissement

En mode refroidissement, le condenseur se décharge dans les sondes. Il est nécessaire de maintenir un régime température de condensation minimum, dépendant des caractéristiques de la PAC, et celui-ci est souvent incompatible avec les régimes de températures fournis par le champ de sondes. Le débit au condenseur est lié à la puissance calorifique de la PAC, avec maintien d'un ΔT constant : il peut donc être variable (régulation en débit). Le débit dans les sondes est modulé indépendamment du débit condenseur par une vanne trois voies et mélangé au débit du condenseur pour assurer la température de condensation (régulation en température)

Note : la régulation du mode refroidissement et les composants nécessaires peuvent être ou non intégrés à la PAC en fonction de ses caractéristiques techniques.

• Geocooling

Bien qu'il soit possible de fonctionner en débit constant (débit choisi pour l'appel de puissance maximum), ce cas de figure est particulièrement inefficace lorsque les appels de puissance sont variables. De ce fait :

- soit la température de retour est imposée (consigne), on utilise alors une régulation en température afin de satisfaire la consigne. Dans ce cas, le ΔT est modeste (par exemple, sortie échangeur de geocooling à 20 °C et consigne à 18 °C) et donc le débit est proportionnel à la puissance appelée ;
- soit, si cela est possible, on cherche à maximiser le ΔT par régulation de débit pour obtenir la température de retour la plus basse possible (par exemple, sortie échangeur de geocooling à 20 °C et retour sondes à 13 °C) de manière à minimiser le débit.

• 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 (pompes de circulation à vitesse fixe, vannes). 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'actionneurs (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 c'est elle qui assure la cohérence de l'installation ainsi que sa performance. De ce fait, la sélection des équipements doit prendre en compte leurs possibilités à cet égard.

6 Simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique (STD) intervient en deux phases :

- la STD du bâtiment, dont l'objectif est l'établissement des besoins thermiques du bâtiment ;
- la STD du champ de sondes et de la plateforme de production, dont l'objectif est de valider le fonctionnement de l'installation ainsi que son aptitude à satisfaire les besoins du bâtiment.

6.1 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

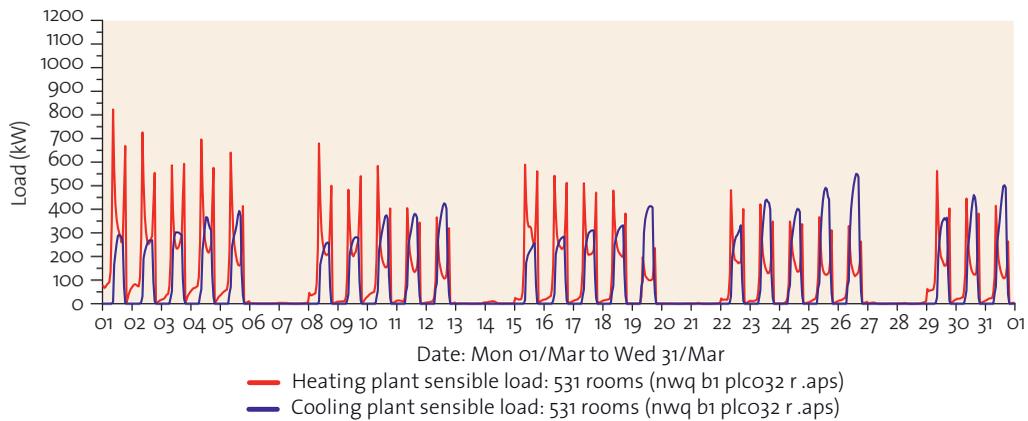
Il est important de noter que les charges de chaud et de froid obtenues en suivant la réglementation thermique sont des valeurs typiques et ne sont par conséquent pas représentatives des besoins réels de chaud et de froid du bâtiment.

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

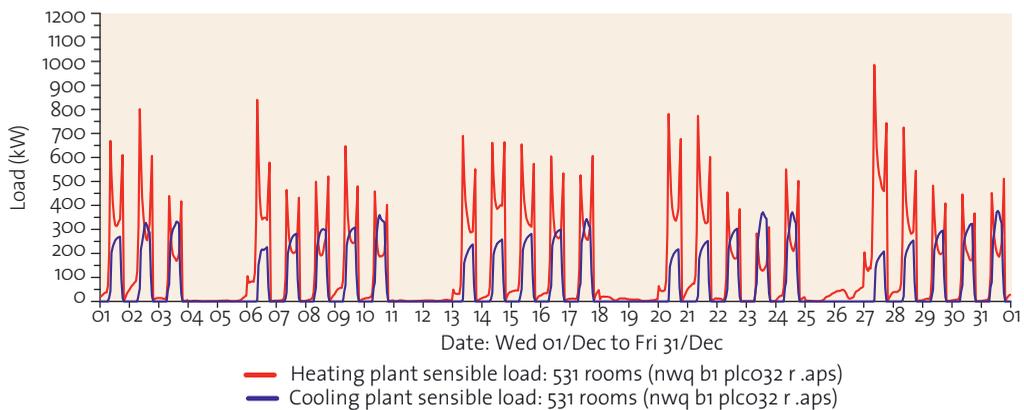
• Coïncidences des charges

La taille de l'échangeur géothermique 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. Ces coïncidences auront une influence sur la taille de l'échangeur si le montage du système permet de récupérer sur le circuit géothermique ou sur une boucle froide la demande de chaud d'une partie du bâtiment pour la réinjecter dans une partie du bâtiment en demande de froid. Ce type de fonctionnement permet de diminuer de façon non négligeable non seulement la taille de la part géothermique du système mais aussi les consommations totales sur l'année. Cette diminution des consommations peut être estimée de façon précise par la simulation thermique dynamique.

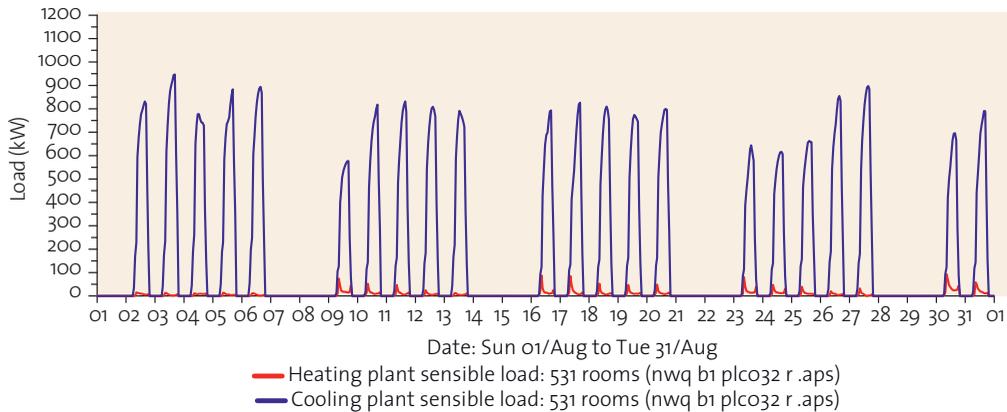
Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux à la mi-saison. Source : Alto Ingénierie.



Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux en hiver. Source : Alto Ingénierie.



Exemple de consommation pour un immeuble de bureaux en été. Source : Alto Ingénierie.



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

6.2 Simulation thermique dynamique du champ de sondes et plate-forme

Outre le dimensionnement du champ de sondes, qui sera abordé plus loin, on utilise comme données d'entrée les résultats de la STD bâtiment d'un part, ainsi que la description technique de la plateforme de production (architecture, nature des composants, règles de régulation) pour réaliser une analyse fonctionnelle de l'ensemble en fonction des besoins et des contraintes imposés par le bâtiment (appels de puissance horaire en chaud et en froid, consignes de production, etc.).

On vérifie ainsi chaque aspect de la plateforme de production au regard du cahier des charges qui lui est imposé, ce qui permet en conception de lever les incertitudes en exploitation (respects des consignes, plages d'utilisation des équipements), d'apporter des actions correctives nécessaires à son bon fonctionnement, voire d'évaluer la performance globale de plusieurs variantes de mise en œuvre.

Un autre avantage de cette analyse est la mise au point des règles de régulation en environnement simulé, qui permet ensuite un déploiement fiable et simplifié de l'automatisme nécessaire au fonctionnement de la plate-forme.

Caractéristiques du sous-sol

1 Paramètres liés à la géologie

Une étude géologique (coupe prévisionnelle des terrains) et hydrogéologique (nappe souterraine, vitesse d'écoulement, artésianisme) est indispensable afin d'anticiper les difficultés potentielles en matière de forage ou de cimentation (pertes).

La NF X10-970 alerte sur le fait que dans les terrains contenant des roches évaporitiques ou présentant des cavités importantes (karsts), l'installation d'une sonde géothermique verticale est vivement déconseillée. Des difficultés de mise en œuvre peuvent être rencontrées, notamment pour la cimentation. Les formations suivantes sont particulièrement concernées :

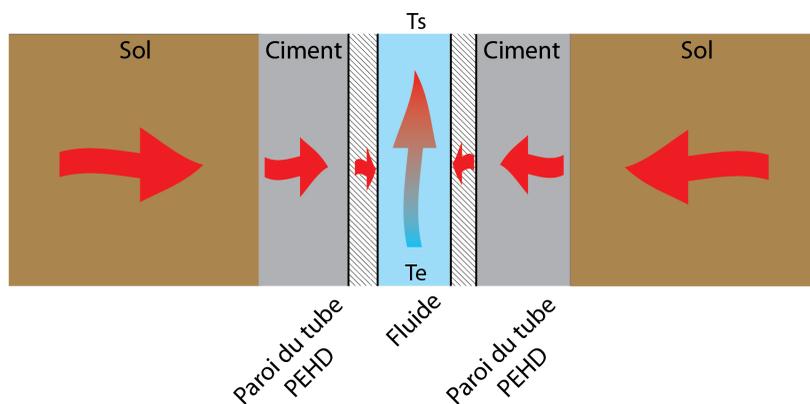
- roches fissurées (granites, gneiss, grès, marnes) ;
- calcaires fissurés, craie et karst (cavités naturelles et anthropiques) ;
- roches volcaniques (pouzzolane, etc.) ;
- évaporites (anhydrite, gypse, halite).

La norme précise également que toutes les précautions d'usage (solutions et moyens nécessaires) doivent être mises en place par le foreur pour anticiper ou maîtriser l'artésianisme.

Note : dans le cas le plus défavorable (sans solution réparatrice), le forage sera abandonné selon les prescriptions d'abandon définies dans la norme.

2 Transfert de chaleur

Lorsque la température du fluide caloporteur circulant dans l'échangeur géothermique est différente de la température du sous-sol, de l'énergie thermique est échangée entre le fluide et le sous-sol. Si la température du fluide caloporteur est inférieure à celle du sol, des calories sont transférées de la zone non perturbée (située « à l'infini ») vers la sonde géothermique verticale (SGV), par conduction thermique dans le sol.



Note : le schéma présente le cas d'extraction d'énergie au sous-sol. Dans le cas d'injection d'énergie, le sens des flèches est inversé.

Le flux de chaleur traverse le sol, puis la cimentation et les parois de la canalisation par conduction. Enfin, l'énergie thermique est transférée au fluide par convection.

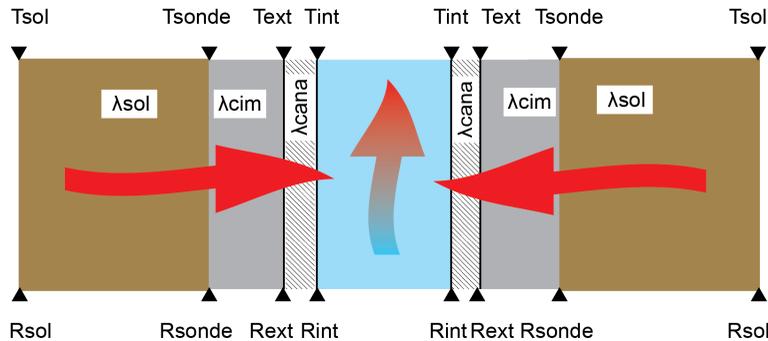
Par soucis de simplification, on considère le système comme étant en régime stationnaire, et on réduit la sonde géothermique à une canalisation unique scellée dans un puits de forage.

Lorsqu'une puissance P , en watts (W), est extraite de la sonde de longueur L (puissance linéique P/L), un flux de chaleur s'instaure entre le fluide et le sol à une distance « infinie » (en pratique quelques mètres à quelques dizaines de mètres). La température du sol à l'infini est supposée restée constante (température stabilisée à la valeur nominale T_{sol}). Le flux de chaleur traversant les différents milieux se compose de :

- un flux de chaleur par conduction thermique à travers le sol (F_{sol}), auquel peut s'ajouter un transfert par convection en cas de présence de nappes circulantes) ;
- un flux de chaleur par conduction thermique à travers la cimentation (F_{cim}) ;
- un flux de chaleur par conduction thermique à travers la canalisation (F_{can}) ;
- un flux de chaleur par convection à l'interface fluide/paroi (F_{conv}).

R_{int} en mètres (m), est le rayon interne de la canalisation, R_{ext} (m) le rayon externe. R_{sonde} (m) est le rayon du forage de la sonde, R_{sol} est la distance entre la sonde et le sol à l'infini.

En régime stationnaire, les flux sont tous égaux et correspondent à la puissance P (W) extraite de la sonde. En détaillant les équations qui régissent les différents flux pour le modèle simplifié retenu, on obtient en régime stationnaire :



$$\text{Flux thermique dans le sol, } F_{sol} = A \times \lambda_{sol} \times (T_{sol} - T_{sonde}) = P$$

$$\text{avec } A = 2 \times \pi \times L / \ln(R_{sol} / R_{sonde}), \text{ donc } A > 0$$

$$\text{Flux thermique dans la cimentation, } F_{cim} = B \times \lambda_{cim} \times (T_{sonde} - T_{ext}) = P$$

$$\text{avec } B = 2 \times \pi \times L / \ln(R_{sonde} / R_{ext}), \text{ donc } B > 0$$

$$\text{Flux thermique dans la canalisation } F_{can} = C \times \lambda_{can} \times (T_{ext} - T_{int}) = P$$

$$\text{avec } C = 2 \times \pi \times L / \ln(R_{ext} / R_{int}), \text{ donc } C > 0$$

$$\text{Flux thermique convectif } F_{conv} = D \times h \times (T_{int} - T_{fluide}) = P$$

$$\text{avec } D = 2 \times \pi \times L \times R_{int}, \text{ donc } D > 0.$$

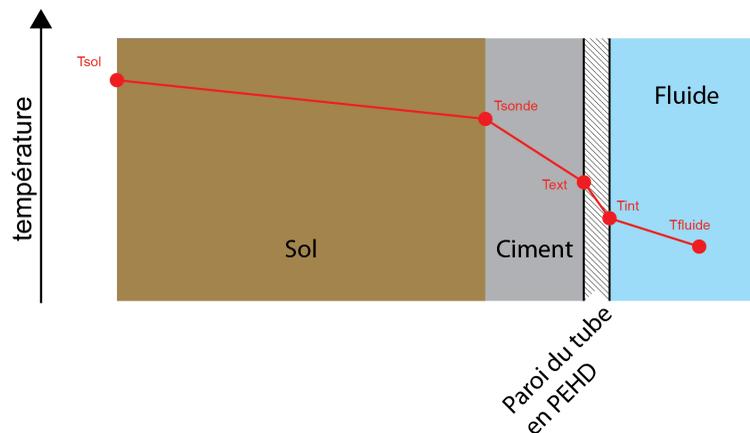
Note : par simplification, on considère ici que le fluide est homogène en température dans le tuyau, ce qui n'est pas vrai dans la réalité ; le fluide variant en température lors de sa traversée de la canalisation.

λ_{sol} est la **conductivité** du sol (W/m·K), c'est un paramètre statique qui dépend de la géologie du site.
 λ_{cim} est la **conductivité** de la cimentation (W/m·K), c'est un paramètre statique qui dépend de la nature de la cimentation.

λ_{can} est la **conductivité** de la canalisation (W/m·K), c'est un paramètre statique qui dépend de la nature de l'échangeur.

h est le coefficient d'échange par convection interne de la canalisation (W/m²·K), c'est un paramètre dynamique qui dépend de la nature de l'écoulement du fluide.

Le régime stationnaire étant supposé établi, on obtient la répartition de température suivante (en mode extraction de calories par le fluide).



• Définition

Pour une sonde de profondeur L (m) dont on extrait une puissance P (W).

Le paramètre $R_s = (T_{\text{sonde}} - T_{\text{sol}}) \cdot L/P$ est la résistance thermique du sol en K·m/W.

Le paramètre $R_b = (T_{\text{fluide}} - T_{\text{sonde}}) \cdot L/P$.

L/P est la résistance thermique de la sonde en K·m/W.

Les résistances s'additionnent pour obtenir une relation entre la température du sol et la température du fluide : $R_b + R_s = (T_{\text{fluide}} - T_{\text{sol}}) \cdot L/P$.

• Convection dans la sonde

- La nature de l'écoulement du fluide dans la canalisation détermine la qualité de l'échange thermique entre le fluide et la paroi. Pour un fluide et un diamètre de canalisation donnés : le régime d'écoulement laminaire se produit pour des vitesses d'écoulement faibles. Les échanges thermiques avec la paroi de la canalisation (et donc le coefficient d'échange) sont faibles, pénalisant la performance de l'échangeur, entraînant ainsi une différence de température importante entre la canalisation et le fluide.
- Le régime d'écoulement turbulent se produit aux vitesses d'écoulement élevées. L'écoulement turbulent favorise l'homogénéisation de la température du fluide. Par conséquent, le coefficient d'échange est supérieur en régime turbulent à celui du régime laminaire, entraînant une réduction de la différence de température fluide/paroi.

On calcule un nombre sans dimension, appelé nombre de Reynolds, noté Re , afin de déterminer la nature de l'écoulement. Dans la pratique, on s'assurera donc que les régimes de circulation dans les sondes sont turbulents. Ceci est le cas si Re est supérieur à 3 000.

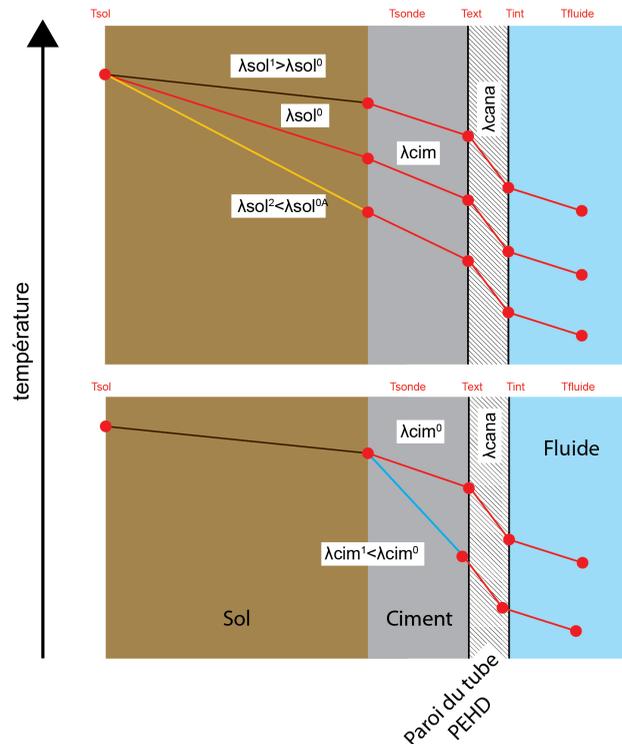
Ainsi, le dimensionnement des pompes de circulation résulte de la recherche d'un compromis entre l'amélioration de l'échange convectif et la minimisation des pertes de charge dans les sondes et le réseau hydraulique de raccordement.

3 Paramètres physiques liés aux terrains

3.1 La conductivité thermique

En se reportant aux équations précédemment définies, on observe que pour une même puissance d'extraction P :

- dans les équations de conduction, la conductivité et la variation de température sont inversement proportionnelles. En pratique, le sol étant à la température nominale T_{sol} « à l'infini », cela signifie qu'un sol de conductivité élevée se refroidit moins au voisinage des sondes qu'un sol de conductivité faible, pour une même puissance produite ;
- une conductivité élevée de la cimentation permet un faible écart de température lors de la traversée de la cimentation. En pratique, on emploie une cimentation ayant si possible une conductivité au moins égale à celle du sol afin de ne pas présenter un « frein thermique » trop élevé lors du transfert ;
- la conductivité de la canalisation impose elle aussi une différence de température inversement proportionnelle. Dans la pratique, la conductivité des sondes PE est faible, ce qui est contre-productif d'un point de vue énergétique, alors que la souplesse du PE reste un avantage indéniable pour la mise en œuvre de l'échangeur ;
- enfin, les effets des trois phénomènes de conduction s'additionnent et influent collectivement sur la différence de température entre le sol « à l'infini » et l'intérieur de la canalisation, comme cela est indiqué sur la figure suivante.



Le phénomène s'applique de manière symétrique à l'injection de chaleur (rafraîchissement du consommateur).

On retiendra donc que la différence entre la température du sol « à l'infini » et la température moyenne du fluide caloporteur est conditionnée par la puissance linéique appliquée à la sonde, ainsi que par les caractéristiques thermiques des milieux rencontrés (matériau de la canalisation, cimentation, nature du sol) et le débit de circulation. Pour une même puissance linéique et une même sonde, un sol de faible conductivité implique un écart de température plus élevé qu'un sol de conductivité supérieure, et donc une température moyenne du fluide plus basse.

Lorsque la conductivité thermique diminue, il faut diminuer la puissance linéique en agissant sur le linéaire de sondes, afin que la température du fluide caloporteur soit compatible avec les niveaux de température imposés par les équipements de surface. Pour une même puissance, un champ de sondes dans un sol de faible conductivité nécessite un linéaire supérieur à celui d'un champ de sondes dans un sol de conductivité supérieure.

On donne en annexe 3 la conductivité thermique pour différents types de roches (source SIA 384/6). On pourra également se référer à la NF X10-970.

3.2 La capacité calorifique

Le sol étant un milieu « infini », on caractérise le niveau d'énergie du sol au voisinage des sondes par l'enthalpie H (i.e. la quantité d'énergie contenue par unité de masse du sous-sol) aux différents points du voisinage des sondes. Ainsi :

- l'extraction de calories du sous-sol induit une diminution de l'enthalpie au voisinage des sondes (variation d'enthalpie négative) ;
- l'injection de calories dans le sous-sol induit une augmentation de l'enthalpie au voisinage des sondes (variation d'enthalpie positive).

La variation d'enthalpie ΔH entre les instants t_0 (sol à température T_0) et t_1 (sol à température T_1) est donnée par la formule :

$$\Delta H = C_{ps}(T_1 - T_0)$$

C_{ps} est la chaleur spécifique (ou capacité thermique) du matériau composant le sous-sol (J/kg·K).

ΔH est la différence d'enthalpie (J/kg).

Souvent, la chaleur spécifique est donnée non pas pour une unité de masse mais pour une unité de volume (C_v , capacité thermique volumique, en J/m³·K), ce qui a l'avantage d'intégrer la densité du matériau et de raisonner en termes de volume de matériau.

Pour une même variation d'enthalpie, la variation de température est d'autant plus importante que la capacité thermique volumique est faible. Dans la pratique, la capacité thermique volumique des terrains habituellement rencontrés se situe entre 2,1 MJ/K/m³ et 2,3 MJ/K/m³.

Pour un volume de matériau V , on peut ainsi calculer l'accroissement de la chaleur ΔQ (en joules, J) contenue dans le volume pour une élévation de température ΔT :

$$\Delta Q = VC_v\Delta T$$

Exemple : soit un champ de sondes de 64 sondes (8 x 8) en placement quadratique, espacement 6 mètres, profond de 100 m dans un sol de capacité thermique volumique de 2,1 MJ/m³.K. Le champ de sondes est carré, le terrain associé est donc également carré, avec un côté de 42 mètres, auquel on ajoute un demi espacement sur les bords (soit 42 + 3 + 3 = 48 mètres). Le volume associé au champ de sondes est donc environ 48 × 48 × 100 = 230 400 m³. Une variation de 1 K à la baisse de la température moyenne du champ de sondes correspond alors à une extraction de 230 400 × 2,1 MJ, soit 134,4 MWh (note : 1 kWh = 3,6 MJ).

3.3 Influence de la présence d'un aquifère

La présence d'un aquifère est généralement un facteur favorable pour le fonctionnement d'un champ de sondes. En effet, la saturation du milieu a généralement comme effet de doper la conductivité des roches ; de plus, un éventuel mouvement de nappe constitue un apport énergétique dans le champ de sondes. Elle pourrait en revanche être défavorable dans le cas de stockage énergétique, en particulier en présence de vitesses d'écoulement trop importantes (vitesse de darcy > un demi mètre par jour).

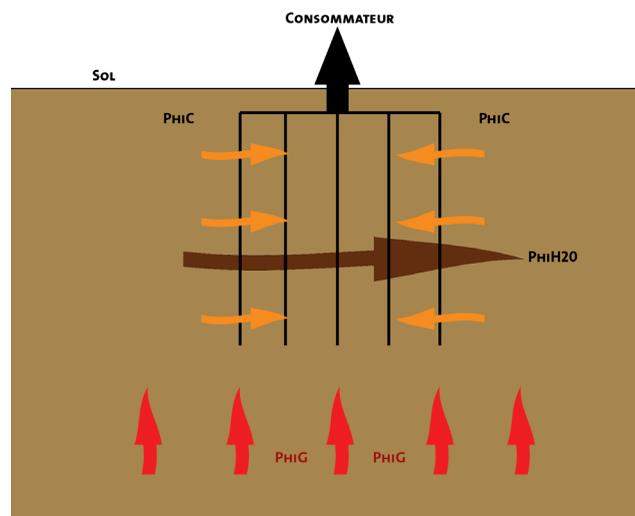
La difficulté est de déterminer l'activité de la nappe (sens et vitesse d'écoulement, battement) et d'évaluer son impact sur le champ de sondes. Un recours aux outils numériques est alors indispensable.

4 Bilan énergétique du sol

L'énergie contenue dans le sous-sol au voisinage des sondes provient de plusieurs sources :

- les flux de chaleur naturels :
 - le flux géothermique, φ_G , variable en fonction de la géologie rencontrée ;
 - le flux de chaleur issu du déplacement d'eau contenue dans le sol (transport de calories par écoulement en milieu poreux ou fracturé), φ_{H_2O} ;
- le flux de chaleur issu de l'échange entre le champ de sondes et le terrain situé à l'infini, à une température non perturbée, φ_C .

Schéma simplifié des échanges de chaleur dans le sous-sol au voisinage des sondes.



Remarque : le flux de chaleur géothermique φ_G est généralement négligeable devant le flux de chaleur φ_C provoqué par l'exploitation du champ de sondes. À l'échelle du globe terrestre, la valeur

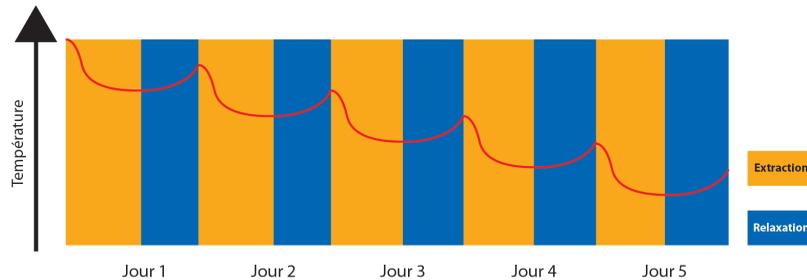
moyenne est de $0,06 \text{ W/m}^2$. Le flux ϕG fixe cependant le gradient géothermique. Pour un milieu homogène, sans circulation d'aquifères et sans « termes sources » (dégagement de chaleur par une réaction chimique exothermique, par exemple), le gradient géothermique dT/dz (en K/m) est donné par :

$$dT/dz = \phi G / \lambda_{\text{sol}}$$

où λ_{sol} est la conductivité thermique du terrain (en $\text{W}\cdot\text{m}/\text{K}$).

Sous l'action de la somme des différents flux, la quantité d'énergie contenue dans le sol au voisinage des sondes va varier.

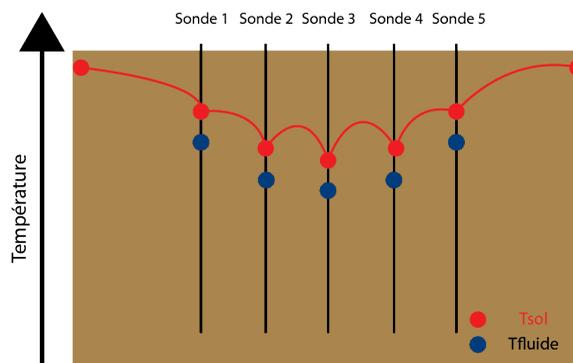
Évolution journalière de la température du sous-sol au voisinage des sondes.



Lorsque le champ de sondes est sollicité par le consommateur, entre deux instants « proches » (par exemple après une journée d'extraction), la température du sol varie en conséquence. Ensuite, une phase de relaxation (par exemple arrêt nocturne) permet une régénération par les flux naturels, généralement partielle, du niveau d'énergie (et donc une remontée des températures relatives). On comprend alors que, sur plusieurs jours, ces cycles se succèdent, si bien qu'à un instant donné la quantité d'énergie disponible dépend de l'historique de l'utilisation. Le chronogramme ci-dessus montre l'évolution de la température moyenne du fluide dans le champ de sondes utilisé en extraction de chaleur sur plusieurs jours.

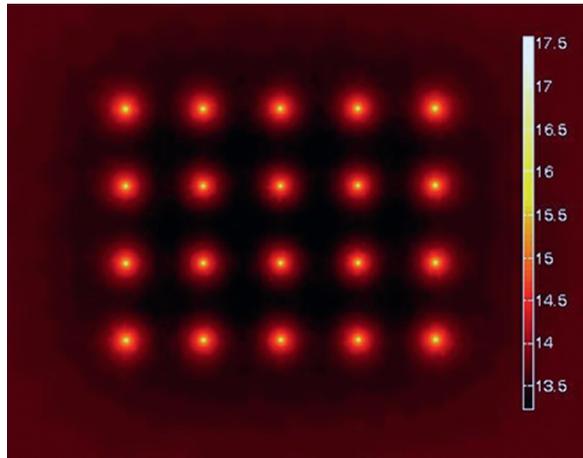
5 Interactions thermiques entre sondes

À l'intérieur du champ de sondes, le sol ne doit pas être considéré comme stable en température car, en chaque point, il subit l'influence thermique de chaque sonde. La température du sol évolue donc, ce qui influe naturellement sur la température du fluide dans chaque sonde. L'évolution de la température à l'intérieur du champ de sondes dépend alors principalement de la puissance linéique appliquée à chaque sonde, ainsi que de la distance (écartement) entre les sondes. La figure suivante indique les niveaux de température type dans une coupe verticale d'un champ de sondes utilisé en extraction de chaleur (puissance linéique identique sur chaque sonde).

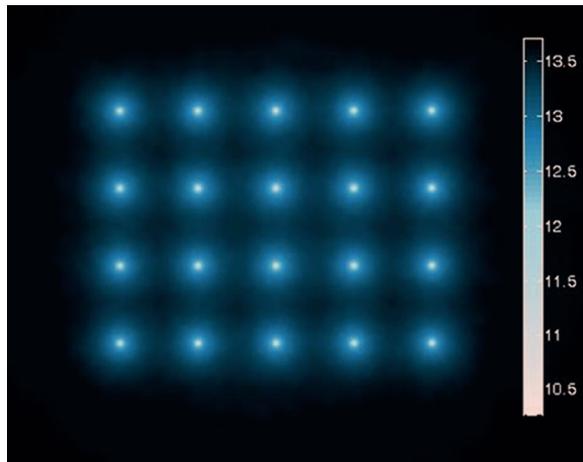


Les figures suivantes rendent compte de ces interactions à deux instants de l'année pour un même champ de sondes : en fin de période de chauffage (abaissement de la température dans le champ de sondes) et en fin de période de rafraîchissement (élévation de la température dans le champ de sondes).

Fin de période de chauffage, modélisation de la température du champ de sondes.



Fin de période de rafraîchissement, modélisation de la température du champ de sondes.



On note que pour une même sollicitation énergétique, plus les sondes sont rapprochées, plus la différence de température entre le sol à l'infini et l'intérieur du champ de sondes est importante. L'espacement entre les sondes est donc un paramètre qui influence fortement l'évolution de la température du champ de sondes et donc du fluide, ainsi :

- un espacement supérieur ou égal à 10 mètres est généralement la règle pour les applications de chauffage, de rafraîchissement ou réversibles ;
- un espacement compris entre 5 et 10 mètres est utilisé pour les applications réversibles dans lesquelles on cherche à stocker partiellement les calories ou les frigories ;
- un espacement inférieur à 5 mètres est généralement dédié au stockage thermique ; dans ces conditions, plus la température de stockage recherchée est élevée, plus les sondes seront rapprochées. Cependant, le resserrement des sondes peut rendre la réalisation du forage difficile (télescopage).

Dimensionnement d'une solution PAC sur champ de sondes

1 Principes généraux de dimensionnement

Le dimensionnement d'un champ de sondes nécessite plusieurs étapes.

Le prédimensionnement fournit une estimation du linéaire de sondes nécessaire au système. Il se base généralement sur la connaissance, approximative mais néanmoins réaliste, des besoins en termes de puissance et de la consommation énergétique annuelle, ainsi que sur la nature géologique du sous-sol. La connaissance du sous-sol, à ce stade de l'étude, peut éventuellement n'être que bibliographique. Lorsqu'aucune donnée sur le sous-sol n'est disponible, le forage test s'impose permettant d'obtenir les valeurs des propriétés thermiques du terrain de manière assez précise, mais nécessitant alors un surcoût non négligeable alors que la viabilité du projet n'est pas encore assurée. La pré-étude, qui se place très en amont du projet définitif, vise à établir la viabilité de l'installation, ainsi qu'une enveloppe budgétaire permettant de décider de l'intégration ou non du système géothermique dans le projet.

L'analyse hydrogéologique et le test de réponse thermique permettent de lever les incertitudes concernant la ressource. Cette étape incontournable a pour but de définir la nature exacte des matériaux présents dans le sous-sol, la présence éventuelle et l'importance de la nappe, ainsi que les propriétés thermiques du site. Elle nécessite qu'un ou plusieurs forages de test soient effectués.

Le dimensionnement définitif est un processus itératif dont les étapes visent à affiner la nature et les caractéristiques des différents composants (champ de sondes, raccordement, installation de surface) afin de converger vers la définition d'une installation optimale. Du fait du nombre de contraintes à prendre en compte, le dimensionnement définitif nécessite des méthodes numériques de résolution (simulation dynamique).

Le résultat du dimensionnement est :

- la définition du linéaire de sondes nécessaires au projet, ainsi que la validation de la topologie d'implantation effective des sondes retenues ;
- la vérification du comportement sur le long terme du champ de sondes, qui vise à s'assurer de la pérennité du système ;
- la vérification du respect des contraintes imposées par le bâtiment (issues de la STD bâtiment) et de l'adéquation du matériel et des modes de fonctionnement sélectionnés (compatibilité des PAC, dimensionnement des pompes de circulation, compatibilité du geocooling, etc.) ;
- l'évaluation de la performance de l'installation.

2 Paramètres à prendre en compte

La principale difficulté rencontrée lors du dimensionnement est de satisfaire aux différentes contraintes imposées par le projet. Les négliger peut être préjudiciable au bon fonctionnement de l'installation. C'est pourquoi il est nécessaire de procéder méthodiquement afin de décider de la viabilité d'un projet.

2.1 Nature du sous-sol

Les paramètres du sous-sol qui doivent être déterminés avec précision sont la conductivité thermique moyenne au droit du site, ainsi que la capacité thermique volumique du sous-sol. La capacité est estimée par observation des cuttings et du type de roches rencontré lors de l'opération de forage. Un test de réponse thermique permet par la suite de mesurer la conductivité thermique moyenne du sol sur la profondeur du forage. La connaissance des aquifères est également importante : identification, épaisseur, gradient de nappe, perméabilité et porosité efficace.

2.2 Contraintes physiques

De préférence, on utilise les espaces non construits pour implanter les sondes (espaces verts, parking) afin de permettre une éventuelle intervention sur les canalisations de liaison pendant la phase d'exploitation. Le placement des sondes sous les bâtiments est possible en environnement urbain, cependant il doit être compatible avec les contraintes mécaniques imposées par le bâtiment sur le sous-sol.

Lorsque la surface disponible est insuffisante, il est possible de reporter le linéaire de sondes sur des forages profonds (i.e. de 150 à 300 mètres). L'emprise au sol du champ de sondes s'en trouve alors réduite. Cependant, il faut avoir à l'esprit que, pour un même linéaire de sondes et un même site géologique, toute modification de profondeur ou de topologie dans le placement des sondes implique une modification des caractéristiques de production et de recharge du champ de sondes.

Pour un linéaire donné, le placement de sondes ne doit donc en aucun cas être arbitrairement fixé, afin de satisfaire aux contraintes d'espace, sans qu'une validation par simulation de la topologie soit effectuée qui garantisse la production et la stabilité sur le long terme.

2.3 Contraintes imposées par le bâtiment

Les contraintes imposées par le bâtiment proviennent de la STD du bâtiment et concernent les besoins thermiques de celui-ci. Ces besoins doivent être établis au minimum mois par mois, l'idéal étant une STD horaire aboutissant à la ventilation des appels horaires sur une année pour les besoins des différents postes. Également, les contraintes en température requises par le bâtiment doivent être établies en fonction des émetteurs mis en œuvre.

2.4 Choix techniques

Les choix techniques se portent sur le matériel mis en place : nature et nombre des pompes à chaleur, type d'utilisation, type de montage... Ces données sont, autant que possible, intégrées dans la STD. En tout état de cause, la STD doit statuer sur l'adéquation des choix techniques avec les objectifs de production établis.

2.5 Principes de la simulation dynamique

Le dimensionnement d'un système géothermique met en œuvre des phénomènes fortement couplés. Par exemple, le choix d'une pompe à chaleur influe sur la nature de l'échangeur géothermique, lui-même conditionné par la nature du sous-sol et le niveau de sollicitation du système... La simulation dynamique a donc comme objectif de permettre à l'utilisateur de définir ces couplages, de caractériser l'architecture du système de production, ainsi que la nature de chaque composant, de

modéliser le champ de sondes et d'introduire les contraintes auxquelles doit répondre le système afin de vérifier la cohérence de l'ensemble et d'en prévoir les performances. C'est, à l'heure actuelle, le seul moyen fiable pour dimensionner une installation dans son ensemble, de la pré-étude à l'étude finale.

Son utilisation est incrémentale : en première approche, les différents composants sont approximés :

- le sous-sol est représenté par les propriétés issues du test de réponse thermique ou par des données bibliographiques ;
- la consommation du bâtiment est estimée mois par mois au minimum ;
- les pompes à chaleur sont représentées par un COP moyen ;
- etc.

Au fur et à mesure que les choix se précisent, notamment en ce qui concerne les consommations du bâtiment et la nature des équipements de surface, on affine les données d'entrée de la simulation :

- le modèle du sous-sol est détaillé et inclut la présence et le comportement de nappes potentielles ;
- la consommation du bâtiment est considérée heure par heure, voire le bâtiment est représenté par un modèle thermique réagissant aux données météorologiques (archives) du site considéré ;
- les pompes à chaleur sont modélisées de manière à prendre en compte les variations de COP en fonction des plages de températures utilisées ;
- les auxiliaires sont dimensionnés en tenant compte des pertes de charge ;
- etc.

Outre le dimensionnement de l'installation (linéaire et placement de sondes, notamment), la simulation dynamique permet de déduire :

- le COP global de l'installation sur un cycle annuel, ainsi que l'état d'équilibre du système sur le long terme (généralement 20-30 ans) ;
- l'investissement initial et les coûts d'exploitation, afin de pouvoir mener une étude comparative avec une autre solution.

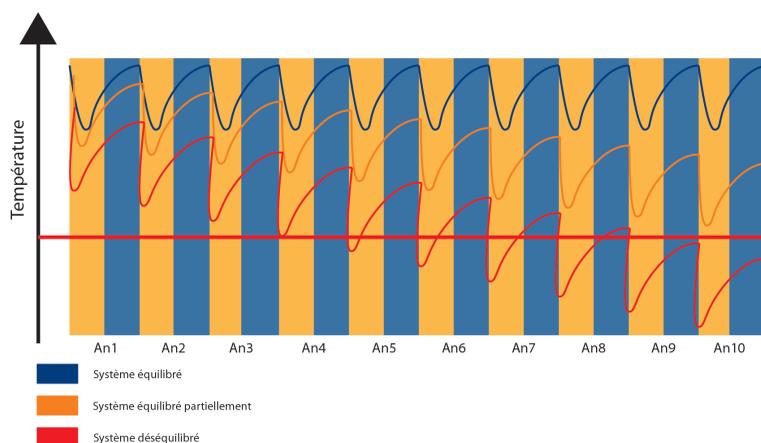
2.6 Résultat de STD : l'équilibre du système

Le dimensionnement doit en premier lieu statuer sur l'équilibre thermique du champ de sondes sur le long terme et sur sa dérive potentielle. La vérification de l'équilibre du système caractérise en première approche l'adéquation de la taille du champ de sondes avec l'application.

Ainsi, lors de l'étude préliminaire (prédimensionnement), la connaissance de cette seule caractéristique seule peut permettre de statuer sur la faisabilité du champ de sondes et de dégager une enveloppe globale concernant l'investissement nécessaire pour la réalisation du champ de sondes.

La dérive peut :

- soit être absente ou ne pas être sensible : dans ce cas le système est équilibré par défaut. C'est le cas idéal qui sera privilégié autant que possible : les performances sont stables et optimales ;
- soit se stabiliser au bout de quelques cycles de fonctionnement : le système est caractérisé par une période de mise en régime. Ce type de comportement est le plus fréquent ; il traduit un dimensionnement optimisé en coût global. Il est nécessaire de s'assurer que la tendance sur le long terme est compatible avec le seuil de fonctionnement de l'installation, dépendant des contraintes physiques et techniques imposées par celle-ci (régime admissible...);
- soit ne pas se stabiliser : le dimensionnement du système est incompatible avec l'utilisation qui en est faite, car la température du fluide passe en dessous du seuil toléré. Cette configuration est bien évidemment interdite.

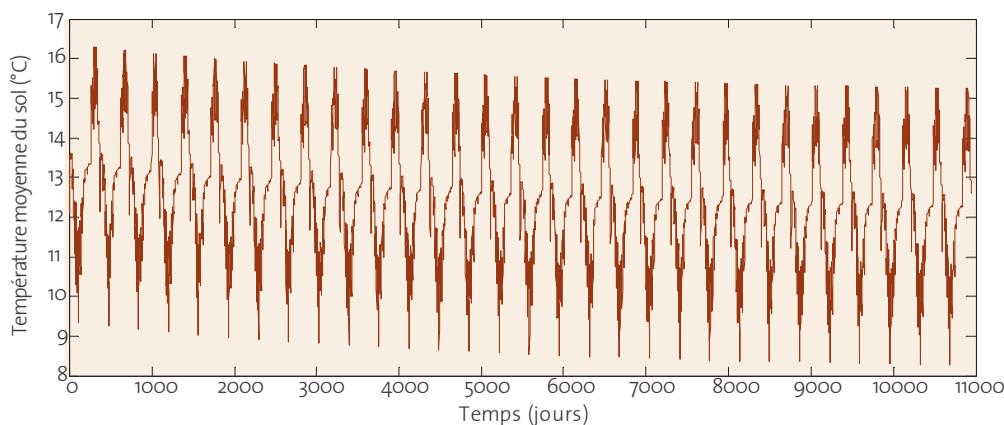


Deux facteurs permettent d'équilibrer les systèmes :

- la recharge thermique naturelle, qui est due aux flux naturels présents sur le site. L'utilisation de la recharge thermique naturelle seule nécessite généralement qu'une période de relaxation suive la période d'utilisation du système. Ainsi, dans une application de chauffage (resp. rafraîchissement) la période estivale à elle seule (resp. hivernale) devrait permettre au sol de reconstituer son capital ;
- la recharge contrôlée qui gère l'équilibre du système *via* des cycles de charge/décharge. C'est le cas des applications réversibles équilibrées, qui alternent chauffage et rafraîchissement et ne nécessitent pas de période de relaxation, ou encore des applications utilisant une recharge artificielle (héliogéothermie, stockage intersaisonnier, couplage multi-consommateurs complémentaires).

La figure suivante montre l'évolution de la température moyenne à proximité des sondes d'un champ de vingt sondes sur trente ans obtenue par STD. Le système est bien équilibré, la dérive à trente ans est d'environ $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$: le sol reste à une température permettant le fonctionnement des PAC et du geocooling dans ce cas précis (vérification des régimes de fonctionnement).

Simulation par STD de l'évolution de la température du sol d'un champ de 20 sondes après 30 ans d'utilisation pour chauffage et rafraîchissement.



2.7 Résultat de STD : les régimes de fonctionnement

Une fois l'équilibre validé, l'analyse des régimes de fonctionnement permet de statuer sur l'adéquation de la production avec les besoins exprimés. Ce niveau s'intéresse essentiellement au volet comportemental de la plate-forme a pour but de vérifier :

- le respect des contraintes imposées par le matériel (régimes sondes et plages d'utilisation des PAC) ;
- le fonctionnement du geocooling ;
- les débits maximums nécessaires afin de dimensionner les pompes de circulation ;
- et plus généralement, toute caractéristique propre à la plate-forme (modes de fonctionnement et charge des PAC ou d'une thermofrigopompe, fonctionnement de l'appoint...).

L'analyse peut être menée sur le long terme afin d'observer l'impact de la dérive éventuelle du champ de sondes sur les régimes de fonctionnement, notamment en ce qui concerne l'utilisation du geocooling.

2.8 Résultat de STD : la performance

Enfin, la connaissance des puissances produites en chaud et en froid, de la puissance absorbée par les PAC, ainsi que des débits de circulation nécessaires permettent d'évaluer la performance globale du système géothermique. L'analyse peut être menée sur le long terme afin d'observer l'impact de la dérive éventuelle du champ de sondes sur les performances.

3 Logiciels de dimensionnement de l'échangeur géothermique

Il existe des logiciels à l'attention des ingénieurs CVC qui travaillent sur des projets de géothermie très basse énergie pour le chauffage et le rafraîchissement de bâtiments.

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

Ils utilisent une base de données avec des informations précises sur le rendement des pompes à chaleur du marché à différents débits et températures. Plusieurs types de capteurs peuvent être définis : sonde verticale profonde, capteur horizontal, capteur immergé dans une eau de surface... Les calculs prennent en compte les types de sol 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 fichiers résultats peuvent donner le nombre de sondes et leurs profondeurs, l'impact sur la température du sol sur dix ans ou plus, 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 champ de sondes

Note : la mise en œuvre de l'ouvrage devra être réalisée conformément à la NF X10-970.

① Configuration générale des ouvrages

La configuration générale du champ de sondes doit tenir compte de l'espace disponible sur la parcelle, de l'orientation du bâtiment et des contraintes administratives et réglementaires locales.

La présence d'une nappe, de son sens et de sa vitesse d'écoulement (si connue) peuvent également influencer sur la configuration du champ de sondes.

Un soin particulier doit être apporté pour la conception et la réalisation du raccordement du champ de sondes avec le bâtiment (sécurisation du chantier, repérage des tranchées par un grillage avertisseur, isolation des tubes de liaison), ainsi qu'au positionnement des équipements (pompes de circulation, vannes régulation débit, purges).

Concernant l'implantation des sondes en limite de propriété, il est recommandé dans la NF X10-970 de respecter la distance minimale de 5 mètres entre l'axe de chaque forage et la limite de propriété la plus proche, afin de prévenir les conflits d'usage. La norme précise également que si la géométrie du terrain ne permet pas de respecter cette distance de 5 mètres, la distance entre les sondes et la limite de propriété la plus proche pourra être réduite jusqu'à une distance incompressible de 2,50 mètres, à condition d'approfondir la profondeur initiale de chaque sonde de 5 % pour toute diminution de la distance avec la limite de propriété de 50 cm. En tout état de cause, les sondes ne pourront pas être implantées à moins de 2,50 mètres de la limite de propriété.

Note : cette prescription s'applique directement pour les sondes géothermiques individuelles et non pour le champ de sondes qui est dimensionné et implanté par le bureau d'étude. Ce dernier devra toutefois s'assurer qu'il n'y a aucune interaction avec des ouvrages déjà existants.

② Programme de forage et acquisition de données

Pour réaliser le champ de sondes, le programme de forage doit faire l'objet d'une planification permettant une progression sécurisée du chantier.

Idéalement, chaque forage devrait s'accompagner de l'enregistrement des paramètres d'avancement de l'outil de forage (données pressiométriques, vitesse d'avancement), ainsi que d'un relevé de la coupe géologique, à partir des cuttings.

L'enregistrement de ces paramètres est fortement recommandé, en particulier pour les forages de test effectués en avant-projet. Ces données sont importantes, car elles permettent, par recouplement avec la coupe géologique et les résultats du test de réponse thermique, de mieux cerner le comportement du sous-sol, notamment au niveau des cavités et des arrivées d'eau, permettant ainsi de dimensionner le système en toute connaissance de cause.

D'autres paramètres peuvent être nécessaires pendant les forages du champ de sondes :

- la mesure de déviation de l'outil de forage, qui consiste à établir la déviation par rapport à la verticale d'un forage. Effectuée sur un nombre arbitraire de forages du champ de sondes, elle permet d'affiner ou de choisir la technique de forage la plus adaptée afin d'assurer le respect de l'écartement entre les sondes. Ce test est d'autant plus nécessaire que les sondes sont rapprochées, car les risques de croisement de sondes, potentiellement destructifs, s'accroissent avec la réduction des distances de forage ;
- la reconnaissance des cavités et fractures : elle permet de localiser les segments de forages potentiellement problématiques pour la cimentation (fuite de coulis) et d'agir en conséquence, notamment par l'emploi de chaussettes géotextiles.

3 Analyse géophysique sur site

Cette étape complémentaire est recommandée si la nature du sous-sol au droit du champ de sondes est inconnue (aucunes données hydrogéologiques). L'analyse géophysique consiste principalement à identifier le potentiel du sous-sol et de la ressource. Pour statuer de manière plus précise sur les possibilités de recourir à une solution sur sondes pour les usages concernés, il est indispensable de déterminer :

- la conductivité apparente et la chaleur spécifique du site étudié, en première approximation par analyse bibliographique (si toutefois les données suffisantes concernant la nature du sol sur la profondeur *a priori* du projet sont disponibles). Ces données doivent être validées, lorsque l'utilisation d'un champ de sondes est retenue dans le projet, par le biais d'un test de réponse thermique (*voir chapitre suivant*) ;
- l'existence et le comportement probable d'une nappe au droit du projet, notamment sa vitesse d'écoulement (vitesse effective de déplacement en mètre par an). En effet, le rôle de la nappe peut être déterminant en fonction des utilisations prévues du champ de sondes, dans la mesure où celle-ci peut représenter un atout (dans une application en mode chauffage par exemple, la nappe peut recharger thermiquement le champ de sondes par le biais de son déplacement et de son apport calorique) ou un inconvénient (dispersion parasite dans une application de stockage thermique) ;
- la structure du sous-sol : état fracturé ou non, perméabilité. En effet, la présence de failles au droit du site peut présenter les difficultés suivantes : complexité accrue du forage, voire impossibilité de se tenir aux objectifs de profondeur d'une part, difficulté et surcoût potentiel de la cimentation (fuites de coulis) d'autre part. Enfin, la présence de karst ou d'arrivée d'eau de surface intermittente peuvent rendre difficile, voire impossible, la prédiction du comportement sur le long terme du champ de sondes.

Plus que tout autre paramètre, l'analyse des spécificités hydrologiques du site peut apporter en amont du projet une connaissance déterminante permettant d'évaluer la possibilité ou non d'opter pour un champ de sondes. Cette analyse devrait donc être prioritaire à toute autre dès lors que l'utilisation d'un champ de sondes est envisagée.

4 Test de réponse thermique

Le test de réponse thermique constitue une étape préalable indispensable pour dimensionner un système énergétique mettant en œuvre un ensemble de pieux échangeurs et/ou sondes géothermiques verticales. Le test est réalisé à l'aide d'une sonde géothermique pilote installée sur le site même du futur système géothermique. La sonde test sera intégrée par la suite au champ de sondes.

4.1 Principe

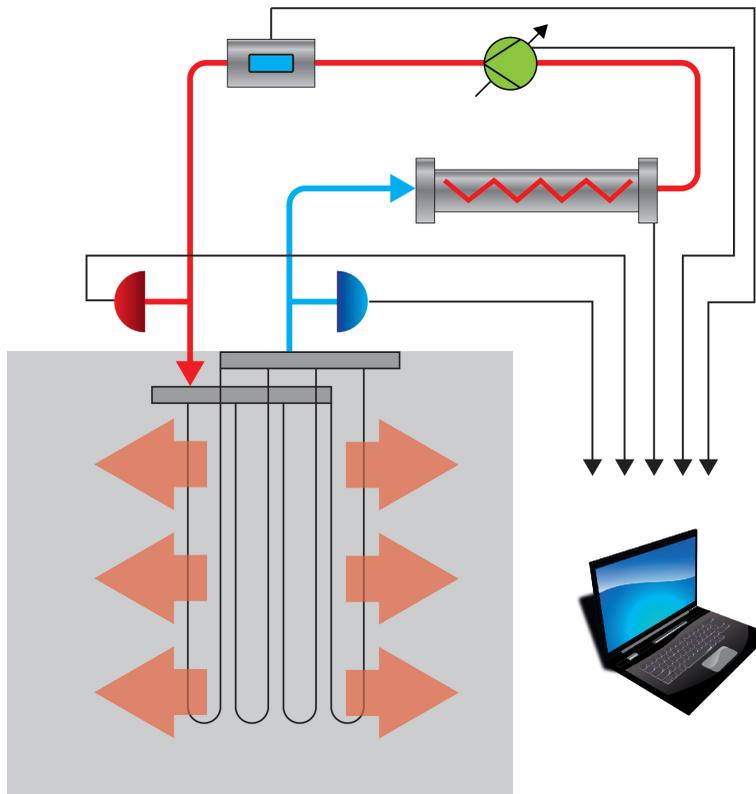
Le test de réponse thermique est basé, en l'état actuel des connaissances, sur la théorie de la source linéaire de chaleur (Ingersoll). En considérant la sonde comme une source linéaire de chaleur de longueur infinie plongée dans un milieu infini (le sol), la théorie de la source linéaire de chaleur établit en régime permanent (atteint généralement après 24 heures de test), une relation mathématique relativement simple entre les paramètres du test (puissance linéique injectée, diamètre du forage...), la température moyenne du fluide circulant dans la sonde (moyenne des températures d'entrée et de sortie de sonde) et la conductivité apparente du sol.

Le test nécessite donc la mesure en continu du régime de température du fluide en entrée et sortie de sonde tout au long de l'expérimentation.

Il est important de noter que la conductivité mesurée par le test de réponse thermique n'est qu'apparente. Elle rend compte de la diffusion de la chaleur dans le sol, qui dépend de l'influence combinée :

- de la conduction thermique dans les matériaux composant le sous-sol (elle-même dépendante de la conductivité thermique réelle des matériaux) ;
- du déplacement éventuel d'eau dans le sous-sol ;
- de la présence éventuelle de source de chaleur (ou de froid) dans le sol.

Principe général du test de réponse thermique.



Dans la pratique, le test de réponse thermique consiste à mesurer la réponse du sous-sol à un échelon de puissance thermique appliquée à la sonde – typiquement, entre 45 et 55 W/m pendant une durée d'au moins 60 heures. Le stress thermique est appliqué au sous-sol à l'aide d'un appareil spécifique qui injecte cette puissance dans la sonde de manière constante (puissance régulée en température, i.e. débit régulé constant, écart de température régulé constant, voir « *Régulation de puissance* »). La chaleur spécifique du fluide caloporteur doit être parfaitement connue afin de ne pas fausser les résultats. C'est la raison pour laquelle on utilise de manière préférentielle de l'eau de ville dans la sonde de test.

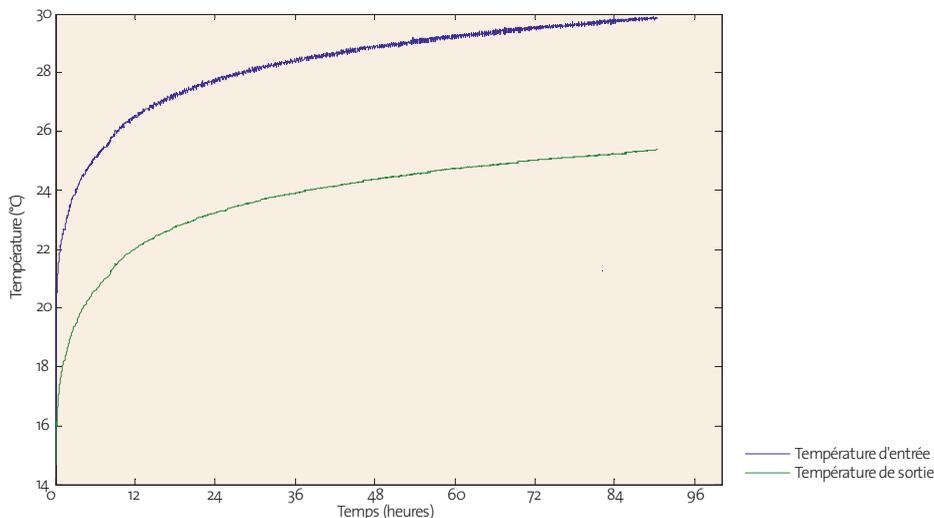
Lors du test, le sol s'échauffe et les régimes de température en entrée et en sortie de sonde évoluent à la hausse. Intuitivement, on remarque que plus le sol est conducteur, moins la hausse des températures est importante car le sol « évacue » les calories. Inversement, moins le sol est conducteur, plus les calories restent confinées autour de la sonde pendant la durée du test : le régime de température augmente en conséquence.

4.2 Méthodologie

Une phase préalable consiste à faire circuler le fluide dans la sonde géothermique à puissance nulle, jusqu'à ce que les températures en entrée et sortie de sonde se stabilisent. La mesure de la température stabilisée atteinte par le fluide permet de déterminer la température initiale moyenne du terrain T_o .

La seconde phase consiste à injecter une puissance thermique P_{th} constante pendant toute la durée du test. Les grandeurs observées, caractérisant la réponse du terrain, sont les températures T_E et T_S du fluide à l'entrée et à la sortie de la sonde géothermique. La stabilité de la puissance injectée pendant la durée du test est un paramètre déterminant pour la précision du test. L'appareil de test doit donc permettre la régulation fine de cette puissance, indépendamment des variations potentielles de la source d'énergie alimentant l'appareil (par exemple, réseau électrique). Les courbes suivantes montrent l'évolution des températures d'entrée et de sortie d'une sonde de 160 mètres de profondeur pendant une injection à 50 watts par mètre.

Évolution des températures d'entrée et sortie pendant le test.



Pendant le test, les températures en entrée et sortie de sonde, ainsi que le débit de circulation du fluide doivent être enregistrés à intervalles réguliers et proches, par exemple toutes les minutes. Le rapport de test doit fournir ces relevés afin que la puissance puisse être vérifiée et que les calculs puissent être validés *a posteriori* par des tiers.

L'analyse de l'évolution des températures du fluide T_E et T_S par la méthode de la source linéaire de chaleur permet alors de déterminer :

- la conductivité thermique apparente moyenne du terrain sur la hauteur de la sonde ;
- la résistance équivalente de la sonde géothermique R_b .

4.3 Détermination de la conductivité

La conductivité est déterminée en analysant la pente de la droite qui approxime la courbe de tendance logarithmique prise par la température moyenne du fluide en phase stationnaire du test. Cette phase est généralement atteinte au bout de 24 heures. Pour l'exemple précédemment donné, cette courbe est la suivante.

Étant donné que l'on observe la tendance logarithmique des régimes de températures, on observe que l'essentiel de l'information est disponible au bout de 72 heures. Ainsi, un test effectué sur une durée supérieure à 100 heures est peu informatif au regard du temps passé à la mesure. Pour plus de détail sur la méthode de calcul formelle, on se reporte à la théorie analytique disponible dans le domaine public.

4.4 Détermination de la résistance thermique de la sonde

La résistance thermique R_b d'une sonde lie, en régime stationnaire, la température moyenne du fluide (T_{fluide} , moyenne des températures en entrée et en sortie de sonde) et celle du terrain à la paroi du forage (T_{forage}) à la quantité d'énergie injectée par mètre linéaire (q en W/m) de sonde :

$$q \cdot R_b = T_{\text{fluide}} - T_{\text{forage}}$$

R_b en m·K/W.

La résistance thermique d'une sonde dépend de sa géométrie (type de sonde, diamètre de forage, profondeur), de la nature de ses constituants (matériau de la sonde, type de cimentation), ainsi que de la pose de la sonde (qualité de la cimentation).

Pour une puissance d'échange donnée, la différence de température est d'autant plus faible que la résistance de la sonde est faible. C'est donc un bon indicateur de la qualité de la sonde que l'on cherchera à minimiser afin de maintenir l'écart de température le plus faible possible, ceci afin d'obtenir, pour des raisons évidentes de performance :

- en mode chauffage, la température la plus élevée possible en sortie de sonde en fonction de l'état instantané du sous-sol ;
- en mode rafraîchissement, la température la plus basse possible en sortie de sonde en fonction de l'état instantané du sous-sol.

La résistance thermique d'une sonde R_b est obtenue de manière expérimentale sur le terrain, par analyse des résultats du test de réponse thermique permettant également d'obtenir la conductivité thermique du sol comme précédemment précisé (voir *paragraphe nature du sous-sol*).

Pour calculer la caractéristique R_b , il est nécessaire d'évaluer au préalable la capacité thermique volumique moyenne du terrain C_v . Elle peut être déduite avec une précision suffisante par recherche bibliographique, à partir des informations relatives à la géologie du site recueillies au cours du forage.

La résistance thermique de la sonde est minimisée :

- par l'emploi d'une cimentation de conductivité élevée ($> 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) coulée avec une plasticité adéquate (remplissage optimal du forage) ;
- par l'emploi d'écarteurs dans la sonde à intervalles réguliers (par exemple, tous les trois mètres) plaçant les tubes proches de la paroi du forage, sans toutefois remettre en cause le rôle de la cimentation qui doit assurer une cohésion parfaite entre les tubes et la paroi ;
- par l'emploi de diamètres de forage d'autant plus importants que la sonde est profonde, afin de limiter le phénomène d'échange thermique par flux croisés entre les tubes de descente et de remontée du fluide caloporteur.

On comprend donc que le soin apporté à la pose de sondes géothermiques est déterminant pour la performance de celles-ci, le test de réponse thermique ayant comme corolaire de permettre d'évaluer la qualité de la pose.

La résistance thermique de la sonde est demandée par les codes de simulation dynamique qui utilisent des modèles analytiques.

5 Acquisition des données thermiques *in situ*

L'acquisition des données thermiques pendant la phase d'exploitation est fortement recommandée afin de pouvoir suivre l'évolution de la zone de captage* thermique (détection d'un déséquilibre effectif). Les capteurs disponibles sont :

- les capteurs fibres optiques permettant un relevé du profil de température le long du forage et donc permettant d'établir le gradient vertical de température. Ils nécessitent d'être placés dans un forage de même profondeur que le champ de sondes ;
- les thermocouples ou sondes résistives, notamment les sondes platines PT100 en montage 3 ou 4 fils. Ils ne permettent cependant que de relever un point de température.

De manière générale, les sondes de température ne devraient pas être placées dans les forages de sondes géothermiques – la température de la cimentation pendant les périodes de fonctionnement n'étant pas représentative de la température moyenne du champ de sondes. Idéalement, les sondes de température devraient être placées de manière équidistante aux sondes géothermiques dans des forages dédiés. Enfin, le thermocouple enfoui à 1/4 de la profondeur du champ de sondes est suffisamment représentatif de la température du terrain, alors que la fibre optique doit être descendue sur toute la profondeur du champ de sondes pour présenter un avantage significatif.

Le relevé peut se faire de manière périodique et manuelle ou mieux automatisée, pour un coût minime en ce qui concerne le thermocouple.

6 Installation des boucles de sondes

La boucle est livrée au foreur avec un certificat de conformité à la norme prNF X 10-960. Le foreur remet ce certificat au client.

Aucune soudure ou raccord ne doit être effectué sur le chantier, sauf pour les liaisons de la boucle au collecteur principal. Dans le cas des boucles simple U qui peuvent être couplées sur le chantier en double ou triple U, l'assemblage des boucles peut être réalisé mécaniquement (vis).

La boucle de sonde* doit être contrôlée pour vérifier qu'elle n'a pas été abîmée par le transport avant sa mise en place et que sa longueur corresponde à la profondeur contractuelle.

Certains fabricants livrent la boucle de sonde assortie d'un tube d'injection du laitier. Si ce n'est pas le cas, le foreur met en place le tube d'injection en même temps que la sonde verticale pour permettre la cimentation.

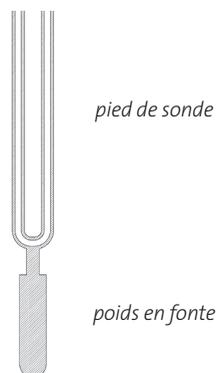
Il est recommandé de mettre en place un « bouclier de protection du pied de sonde », que peuvent fournir certains fournisseurs de boucles, principalement dans les terrains compétents et fissurés. Il protège le pied de sonde et rigidifie la boucle.

Dans le cas des boucles de géométrie U ou multi U, il est conseillé de les équiper d'écarteurs de tubes, permettant d'assurer un espacement plus ou moins constant entre « le tube de froid et le tube de chaud ». Il est recommandé de les placer tous les mètres, de manière à minimiser le contact entre le tube de froid et le tube de chaud.

Exemple de certificat de sonde attestant son numéro de série, ses dimensions et sa composition.



Schéma conceptuel d'une boucle de sonde en U (en coupe) avec le lest (poids en fonte) accroché au pied de sonde.



Exemple de sonde équipée d'un cinquième tube au centre des deux U pour l'injection de ciment, ainsi que d'un lest accroché au pied de sonde.



©Qualiforage/Bourgeois 2007

Sonde en double U équipée d'écarteurs (ici, pas de cinquième tube d'injection). Sur demande, la sonde peut être livrée avec un cinquième tube et des écarteurs avec un trou pour le passage du tube.



© Qualiforage/
Forages géothermie Cissé, 2006

La boucle est mise en place à l'aide d'un treuil, touret ou dérouleur à axe horizontal ou vertical. En cas de difficultés rencontrées avec le touret, la sonde peut être déroulée sur le terrain (si l'espace disponible le permet). Dans ce cas, il faut veiller à éviter les pincements, les frottements et les éraflures au sol. Le rayon de courbure du tube doit impérativement être respecté (*voir prescriptions constructeur*).

Dans le cas d'un pré tubage (particulièrement en acier), il faut placer une protection plastique sur sa bordure qui permet de ne pas abîmer le tube de sonde lors de sa descente (frottement).

En présence d'eau souterraine, la sonde est **remplie d'eau** pour la lester et faciliter sa descente dans le forage.

La sonde est contrôlée en pression et en débit conformément à la NF X10-970.

Mise en place d'une sonde en double U avec un touret qui permet la descente verticale de la boucle dans le forage.



©Qualiforage/Geoforage 2007

Protection mise sur le tubage pour ne pas abîmer la boucle lors de sa mise en place.



© Qualiforage / Geoforage 49, 2006

7 Cimentation des boucles de sondes

Dès que la boucle est installée dans le trou du forage, la phase de cimentation doit débuter immédiatement afin d'éviter que le trou nu du forage ne s'éboule ou ne représente une source de pollution potentielle pour les eaux souterraines. La cimentation consiste au remplissage, sur la totalité de la hauteur du forage, avec du coulis liquide, qui permet de sceller la boucle et en particulier de :

- préserver la qualité des eaux souterraines (c'est-à-dire éviter l'infiltration superficielle de pollutions ou la mise en connexion des nappes) ;
- favoriser les échanges thermiques (par conduction thermique) entre la boucle et le terrain ;
- préserver la longévité de l'installation.

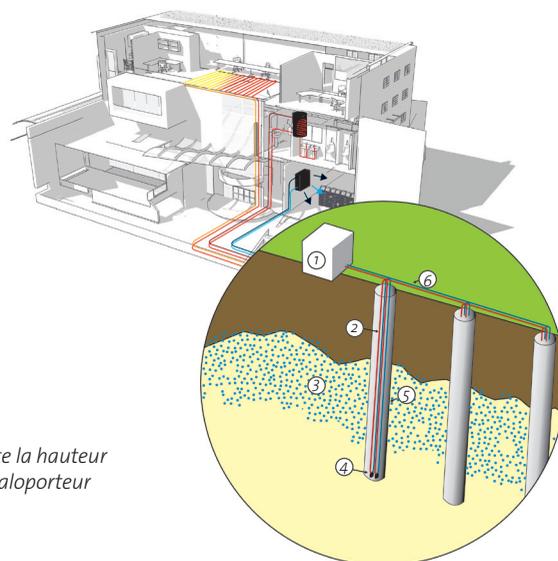
Les laitiers utilisés sont conçus spécialement pour la géothermie, tels que définis dans la NF X10-970. Le foreur doit se référer aux prescriptions du fournisseur pour la préparation du laitier (densité, viscosité) et sur la vitesse d'injection. Le principal critère de choix est sa conductivité thermique qui doit être *a minima* de 2 W/m.K.

Le ciment doit également garantir la longévité de l'ouvrage contre les agressions physico-chimiques de l'eau souterraine et les contraintes mécaniques. Il ne doit pas porter atteinte à l'environnement durant l'opération de cimentation, la période d'exploitation de l'installation géothermique et après l'abandon de l'ouvrage.

La cimentation est imposée sur **la totalité de la hauteur du forage**. Elle est réalisée sous pression au moyen d'une pompe d'injection adaptée, par méthode ascendante à l'aide d'un tube perdu par injection du coulis de remplissage, depuis la base du forage jusqu'à la cote d'environ -1 m du terrain naturel, ce pour faciliter la réalisation de la tranchée de liaison entre les échangeurs et le local technique. La cimentation doit être réalisée sans vide d'air.

Le gravillonnage est proscrit dans tous les cas, même en présence d'eau souterraine. Seuls quelques cas mentionnés dans la NF X10-970 peuvent légitimer une impossibilité de cimenter sur toute la hauteur d'une manière continue.

Schéma conceptuel de la cimentation sur la totalité de la hauteur du forage.



- 1 - PAC
- 2 - Boucle de sonde
- 3 - Aquifère
- 4 - Pied de sonde
- 5 - Ciment sur toute la hauteur
- 6 - Circulation du caloporteur en circuit fermé

Sonde en cours de cimentation à gauche et cimentation terminée à droite (cote du ciment à - 1 m pour faciliter la réalisation de la tranchée de raccordement).



© Qualiforage/
Bonnier Forages, 2006

8 Essais de mise en pression

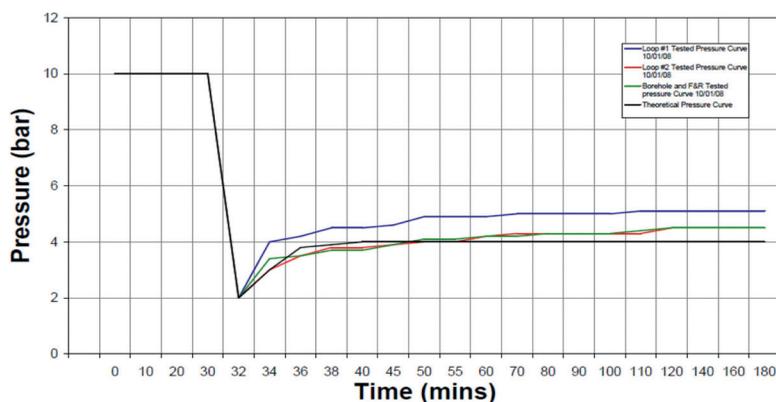
Les essais sont réalisés conformément à la NF X10-970 en suivant les prescriptions du guide de pose et d'utilisation des canalisations en polyéthylène édité par le STR-PE (Syndicat des tubes et raccords en polyéthylène).

Les essais ou épreuves de mise en pression permettent de contrôler l'étanchéité de la sonde, principalement au niveau des soudures du pied de sonde. Ils consistent à mettre la sonde sous pression constante et de mesurer, en fonction du temps, la pression du liquide dans la boucle de sonde. Une chute brutale de pression indique un dysfonctionnement.

Les essais sont réalisés avec une pompe de mise en pression, à l'air ou à l'eau. Cinq contrôles doivent être réalisés, à différentes étapes de la mise en œuvre de la sonde, les essais 1, 4, 5 étant obligatoires :

- 1 réalisé en usine : les sondes doivent être contrôlées en usine. Le fournisseur doit remettre au foreur la fiche d'épreuve et la preuve de son étanchéité. Le foreur remet également au client cette fiche de conformité, en l'intégrant dans son rapport de forage ;
- 2 réalisé par le foreur avant la mise en place de la sonde dans le forage : le foreur réalise un essai représentatif (au minimum à une pression de 3 bars) pour s'assurer que la sonde n'a pas été endommagée durant le transport ;
- 3 réalisé par le foreur après la mise en place de la sonde dans le forage, mais avant la cimentation. Le foreur contrôle l'état de la sonde qui, dans ce cas, peut encore être retirée du forage. Le foreur réalise un essai représentatif (au minimum à une pression de 3 bars). Cet essai est particulièrement préconisé dans les terrains compétents (granite, calcaire, etc.) ou si la descente de la sonde a nécessité un effort particulier ;
- 4 réalisé par le foreur après la cimentation : il permet de valider formellement l'étanchéité de la sonde pour permettre son raccordement à la PAC. Il est réalisé conformément aux prescriptions du guide de pose et d'utilisation des canalisations en polyéthylène édité par le STR-PE :
 - pression : 6 bars ;
 - *Note : une perte de pression d'un bar maximum peut être observée avant la phase de stabilisation de 30 minutes.*
 - durée : 30 minutes minimum ;
- 5 réalisé par l'entreprise responsable de la réalisation du raccordement jusqu'au local technique. Il est réalisé conformément aux prescriptions du guide de pose et d'utilisation des canalisations en polyéthylène édité par le STR-PE :
 - pression : 6 bars ;
 - durée : 30 minutes minimum.

Test de pression. Courbe avec perte de pression en début de test.



9 Raccordements et régulation

Les raccords en tête de forage sont préférentiellement de type électrosoudés ou soudés par thermofusion (au miroir chauffant).

Les raccords mécaniques (par compression) doivent être intégrés dans un regard permettant d'y accéder et de les contrôler. Prévoir, si nécessaire, un dispositif d'évacuation des eaux de ruissellement.

L'électrosoudure doit être mise en œuvre par une personne qualifiée.

Les sondes sont reliées au bâtiment par installation de tuyaux en tranchées. Une fois les soudures effectuées entre sondes et collecteurs, le circuit est de nouveau testé sous pression d'eau. Ainsi terminé, chaque circuit est rincé à l'eau claire et purgé séparément.

Si une fuite apparaît lors d'un test, celle-ci peut être localisée en :

- recherchant des localisations de sol détrempe en surface si celui-ci est généralement sec ;
- cherchant d'éventuelles bulles d'air à la surface du sol si celui-ci est généralement humide ;
- injectant un gaz dans la sonde pouvant être détecté par un appareillage spécifique et en recherchant des traces de ce gaz en surface.

La recherche de fuites est généralement difficile et prend du temps. Il est recommandé de distribuer les sondes entre elles pour permettre une disponibilité de la majorité du circuit en cas de problème sur une sonde et d'effectuer des tests de pression après chaque soudure et connexion.

10 Procès-verbal de réception de l'ouvrage

La réception de l'ouvrage (échangeur) est un acte impératif car elle marque le transfert de propriété de l'ouvrage réalisé au maître d'ouvrage. Elle devra être réalisée telle que définie dans la NF X10-970.

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. Il est à noter que les performances réelles de l'ouvrage ne sont connues qu'après plusieurs années d'exploitation (cinq ans en général).

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 centrales de traitement d'air.

Ces compteurs représentent un investissement justifié. Ils 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 (en option sur la plupart des modèles).

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, aéroréfrigérant, etc.

② Surveillance et entretien du champ de sondes

Au même titre que les autres éléments de l'installation de surface, les équipements du champ de sondes (vannes de régulation de débit, pompes de circulation, appareillages de mesure et de régulation, etc.) doivent faire l'objet d'une surveillance adaptée et régulière, et éventuellement d'un entretien préventif.

Aucune maintenance particulière du champ de sondes n'est nécessaire à part la vérification de la charge antigel et l'étanchéité du circuit. Cette vérification se fait depuis le local technique.

Les nourrices peuvent être localisées en local technique ou dans une chambre d'accès souterraine dans le terrain.

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

Réglementation applicable à la réalisation de champ de sondes

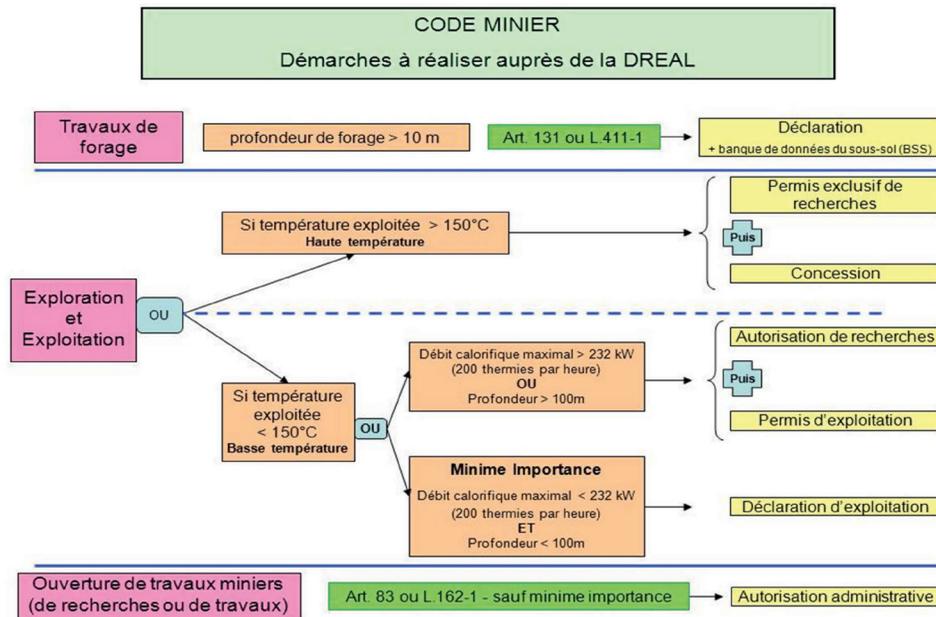
Note : Au 01-01-2012, des modifications sont en cours en vue d'une simplification législative. Les informations sont disponibles sur <http://www.geothermie-perspectives.fr/>

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 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 civil

Une opération sur champ de sondes 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).

Mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives

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 : <http://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 : <http://www.infoenergie.org/>

1 Le crédit d'impôt

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

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 pose 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 Le Fonds chaleur

L'ADEME a mis en place pour les opérations réalisées dans les secteurs résidentiel, collectif et tertiaire, un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie pour la réalisation d'études (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 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 ;
- champ 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 sondes ou sur aquifère selon les cas.

1 Champ de sondes

1.1 Études et maîtrise d'œuvre

■ Étude de faisabilité	5 000 à 10 000 € HT
■ Maîtrise d'œuvre (Suivant importance du projet et limites de la mission)	5 000 à 8 000 € HT
■ TRT (suivi, interprétation) <i>ce coût inclut la réalisation de 2 sondes qui feront partie du champ de sondes final</i>	10 000 à 15 000 € HT
■ Soit un montant total de prestations intellectuelles de	20 000 à 33 000 € HT

1.2 Réalisation du champ de sondes

Le coût d'installation des sondes parfois élevé peut s'expliquer par :

- les contraintes générées par l'intervention en milieu urbain : encombrement des machines de forages, démarches pour intervention auprès des services de la voirie, difficultés d'accès ;
- « une faible concurrence », car il existe peu de foreurs, installateurs de boucle géothermique ayant une expérience sur de gros projets.

Il est très complexe de définir une grille générale de coûts de forage et d'installation des boucles géothermiques tant la multiplicité des critères est importante. Il faut notamment tenir compte des particularités géologiques locales qui peuvent impliquer des difficultés de cimentation (cas des pertes en zones fracturées) et implicitement des différentiels de coût.

Les prix au mètre linéaire de forage généralement constatés en France, intégrant notamment la réalisation du forage, la pose de la boucle de sonde et la cimentation, s'échelonnent entre 40 et 100 euros, suivant la technique de forage utilisée.

1.3 Équipements et raccordement du champ de sondes

Sur ce poste également, 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 sondes et le local technique de production ;
- nombre et taille des nourrices.

1.4 Maintenance

Coût annuel d'un contrat de maintenance des sondes et équipement seulement dans le cas de nourrices installées en extérieur dans un regard :

■ 2 visites annuelles + rédaction d'un rapport

1 000 € HT

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 raccordements)

(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 (<http://www.eurovent-certification.com>) ou équivalent.

Aspects environnementaux

La géothermie envisagée sous la forme de l'exploitation d'un champ de sondes 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, les apports solaires (pour la partie supérieure). L'exploitation du champ de sondes peut influencer localement la température du sous-sol et des eaux souterraines, en fonction de son dimensionnement ou de son mode d'utilisation.

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) ¹⁴
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.

¹⁴ – 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.

4 Impact des fluides (installations géothermiques)

4.1 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

4.2 Fluides caloporteurs (champ de sondes)

Au niveau du champ de sondes, la NF X10-970 précise que le liquide caloporteur ne doit avoir aucune répercussion sur l'environnement en cas de fuite. Il doit être biodégradable *a minima* 98 % (par exemple mélange eau et monopropylène glycol ou équivalent) et être de qualité alimentaire.

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 aquatique de Billom-Saint-Dier (Puy-de-Dôme)

Le pôle aquatique de la communauté de communes de Billom-Saint-Dier répond à une ambition environnementale avérée, techniquement déclinée en deux volets : économie d'énergie et économie d'eau.



© MB Architectures.

Descriptif du bâtiment

Bâtiment neuf – Date de mise en service : 2010

Surface utile : 2 600 m² (couverts), 1 350 m² (SHON), 2 635 m² (extérieurs).

Point fort : le projet architectural et technique retenu s'intègre dans l'environnement paysager tout en maîtrisant les énergies dans le cadre du développement durable.

Besoins à couvrir/usages attendus

Usage : chauffage et déshumidification par refroidissement grâce à un champ de sondes géothermiques.

Besoins énergétiques : 1 508 MWh/an de chauffage et 666 MWh/an de froid.

Point fort : les besoins de chauffage sont limités par une conséquente ouverture sur l'extérieur, atténuée en été par des brise-soleils.

Caractéristiques techniques

Ressource : 12 sondes de 100 mètres de profondeur.

Puissance de/des PAC : 1 PAC réversible de 160kW de puissance chaud et 121 kW de puissance froid.

Émetteurs : centrales de traitement d'air et radiateurs.

Appoint : chaudière gaz.

Point fort : la recharge du sol ; en choisissant l'option de collecter les eaux des bassins dans un bac tampon de 150 m³ et de coupler la récupération de chaleur sur ce bac tampon.

Bilan de fonctionnement

Régime de température de fonctionnement : non communiqué.

Consommation électrique de/des PAC : 323 MWh/an (estimation).

Point fort : retour sur investissement estimé à 5 ans ; économie de 62 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à la solution chaufferie gaz et groupe froid.

Acteurs du projet

Maître d'ouvrage : Pays de Billom-Saint-Dier.

Maître d'œuvre : MBA Moinard Blanchet, Saunier & Associés.

Installateur : Crystal (Romognat, 63).

Foreur : Auvergne forage (Lezoux, 63).

• Pôle de santé d'Aiglemont (Ardennes)

Depuis son entrée en fonctionnement, le pôle santé a soulevé énormément de curiosité chez beaucoup d'élus de collectivités territoriales, intéressés non seulement par son aspect d'équipement médical local, mais aussi par l'utilisation de la géothermie qui y a été faite. Le pôle est maintenant associé au circuit régional des énergies renouvelables.



Descriptif du bâtiment

Bâtiment neuf – Date de mise en service : 2007

Surface utile : 800 m²

Point fort : ce bâtiment a été réalisé par le conseil municipal pour inciter les professionnels de santé à pallier au désert médical local.

Besoins à couvrir/usages attendus

Usage : chauffage/rafraîchissement par sondes géothermiques.

Point fort : la technique du geocooling permet d'assurer un rafraîchissement du bâtiment, parfaitement sain, point sensible dans un établissement de santé.

Caractéristiques techniques

Ressource : 11 sondes géothermiques de 80 mètres de profondeur.

Puissance de/des PAC : 1PAC de 74 kW de puissance chaud et 40 kW de puissance froid.

Émetteurs : plancher chauffant.

Appoint : chaudière gaz.

Point fort : la réalisation de l'installation n'a donné lieu qu'à seul contrat, réduisant le nombre d'intermédiaires à un seul pour le maître d'ouvrage.

Bilan de fonctionnement

Régime de température de fonctionnement : pour l'hiver, 50 °C par -10 °C extérieur et 20 °C par 20 °C extérieur ; pour l'été, 18 °C par géocooling.

Consommation électrique de/des PAC : de l'ordre de 32MWh/an.

Point fort : la géothermie assure 86 % des besoins pendant la période de chauffe permettant une économie de 21 tonnes d'équivalent Co₂. Le retour sur investissement envisagé est de huit ans.

Acteurs du projet

Maître d'ouvrage : municipalité d'Aiglemont.

Maître d'œuvre : Saunier & Associés.

Installateur et exploitant : entreprise Chasac Perrin (Aiglemont, 08).

Autres partenaires techniques : ADEME Champagne-Ardenne.

• Immeuble tertiaire à Besançon (Doubs)

La société HDL (Habitat Développement Local) dont le projet initial prévoyait une rénovation classique avec un chauffage au gaz. La demande des futurs locataires d'assurer le confort d'été dans les bureaux ainsi que la volonté du maître d'ouvrage d'éviter l'installation d'une climatisation, a conduit à repenser complètement le principe du bâtiment.



© EDF R&D.

Descriptif du bâtiment

Bâtiment rénové – Date de mise en service : 2007.

Coût 1 770 €HT/m²

Surface Hors Œuvre Nette : 2 036 m².

Point fort : *engagement fort de la maîtrise d'œuvre sur le projet.*

Besoins à couvrir/usages attendus

Usage : chauffage/rafraîchissement et production d'ECS par sondes géothermiques.

Volume chauffée et rafraîchie : 5 090 m³.

Point fort : *une sur-isolation couplée au geocooling permet de compléter l'impératif du confort d'été.*

Caractéristiques techniques

Ressource : 10 sondes géothermiques de 100 mètres chacune (coût = 55 k€HT).

Coût poste Chauffage, ventilation, rafraîchissement = 194 € HT/m².

Puissance de/des PAC : 2 PAC de 32,6 kW de puissance chaud.

Émetteurs : poutres actives.

Point fort : *un COP chaud de fonctionnement de 4.15 (avec pompe de sondes) couplé à une VMC double flux à récupération rotatif permet au système d'atteindre les objectifs du BBC.*

Le COP froid en geocooling est de 20.

Bilan de fonctionnement 2010

Régime de température de fonctionnement : 30/35 °C des PAC en hiver, et 12/17 °C en geocooling.

La consommation totale du site est de 50 kWh/m², le poste chauffage rafraîchissement ventilation est de 14,5 kWh/m².

COP Chaud(*) = 4.15 (avec pompe de sondes).

COP (*) froid en geocooling = 20

COP Chaud = Chaud consommé par le bâtiment/Cons. élec. PAC + pompe de sondes

Consommation électrique de/des PAC : 199 342 kWh/an soit 9,5 kWh/m²

Point fort : *diminution de 2/3 des émissions de CO₂ générés par le système, coût d'exploitation net de 28 euros par MWh (prime fixe incluse, tarif jaune).*

Acteurs du projet

Maître d'ouvrage : Société Habitat Développement Local.

Maître d'œuvre : Bureau d'étude Image & calcul.

Installateur : Est Énergie.

Autres partenaires techniques : EDF R&D, Est Énergie, Mannfor.

Points à retenir pour l'installation d'une PAC géothermique sur champ de sondes

■ Limiter les besoins du bâtiment en chauffage et rafraîchissement

Engagement d'une démarche de conception bioclimatique idéalement associée à une démarche de qualité environnementale (démarche HQE ou équivalente).

■ Si les données issues de cette première étape permettent d'envisager une solution de pompe à chaleur géothermique sur champ de sondes, il faut alors réaliser **une étude hydrogéologique** comportant une description succincte du projet : le lieu, le nombre de sondes (au préalable il faut avoir une estimation des besoins thermiques en puissance et en kWh).

■ Réaliser l'étude approfondie du sous-sol

Cette étude comprendra *a minima* :

- la ou les valeurs de température ;
- les résultats des tests de diffusivité ;
- la transmissivité des différentes couches concernées ;
- la réglementation en vigueur applicable au projet ;
- le calcul du nombre de sondes (ainsi que leur caractéristiques) pour la puissance souhaitée, 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) ;
- l'impact sur la température à long terme.
- une coupe géologique du forage ainsi qu'un descriptif de l'ouvrage réalisé (diamètre de sonde, diamètre de tuyau, type de bentonite, etc.).

■ Faire réaliser les forages, la mise en œuvre des sondes et des réseaux de liaisons aux collecteurs par un professionnel.

■ Installer les collecteurs et pompes de circulation à vitesse variable.

■ Choisir la ou les PAC comportant plusieurs circuits et certifiée Eurovent.

■ Équiper les réseaux secondaires de pompes à vitesse variable.

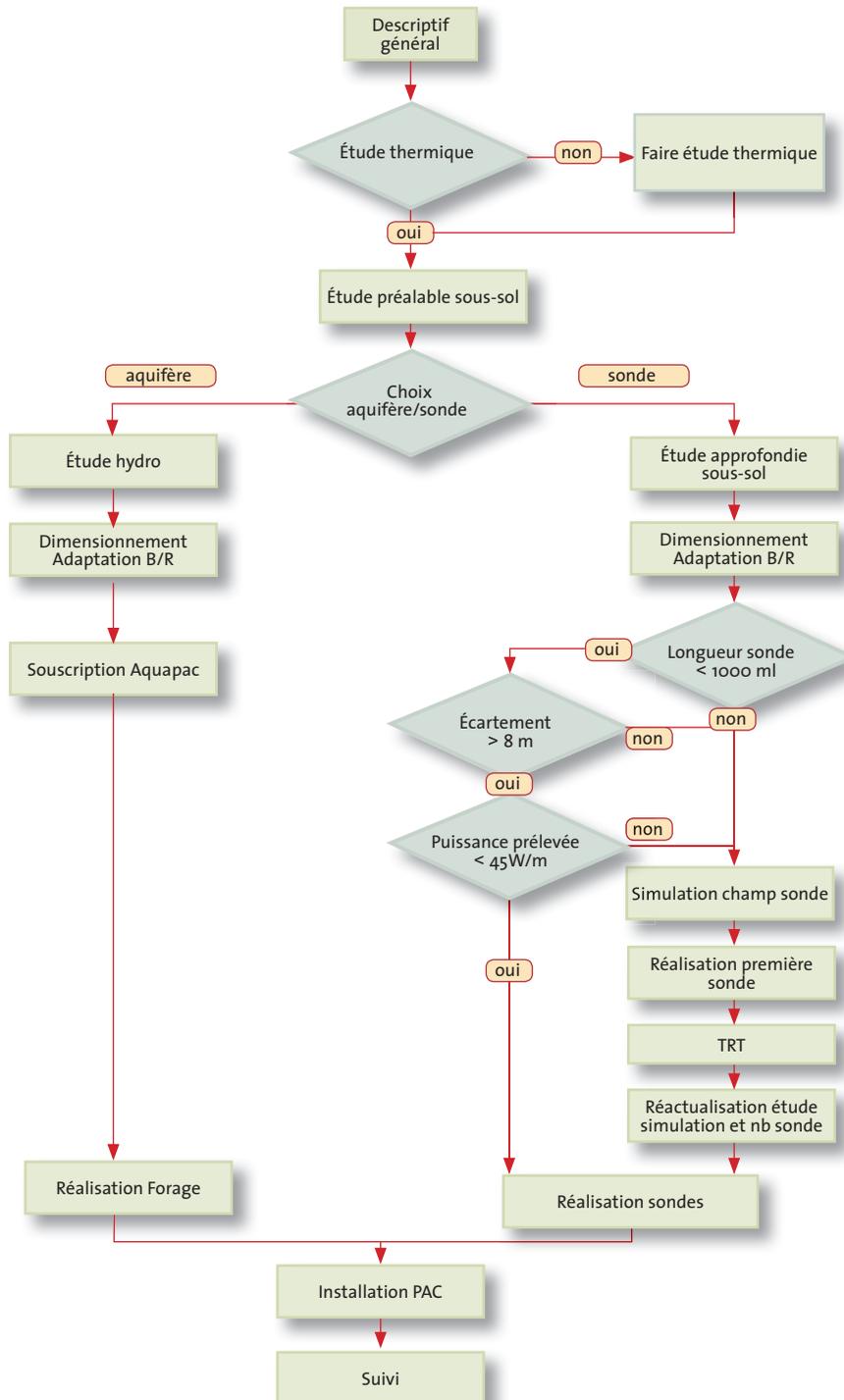
■ Poser des compteurs de calories, frigories et des compteurs d'énergie électrique consommée par la PAC en cas de système centralisé afin de mesurer le COP.

■ 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.

Annexes

① Déroulement d'une opération de pompe à chaleur géothermique sur champ de sondes



② Dimensionnement d'une opération sur champ de sondes – Aide à la décision

La méthode¹⁵ donnée ci-dessous ne représente qu'une estimation grossière, qui ne saurait en aucun cas suffire à établir la viabilité du système. Dans la plupart des cas, on a recours à la simulation dynamique pour affiner et valider les paramètres définitifs. Cette méthode permet néanmoins d'effectuer une première approximation du linéaire de sondes, pouvant orienter en amont le choix des décideurs.

On a introduit au chapitre « Mise en œuvre d'une solution PAC sur champ de sondes » les notions de résistance thermique du sol et de la sonde. Il faut rappeler que ces notions ne sont valables qu'en régime stationnaire. Il a été établi numériquement que, pour un champ de capteurs en placement quadratique avec un espacement entre les sondes B , la résistance du sol R_s , qui ne tient compte que de la diffusion thermique et non du déplacement d'eau potentiel, pouvait être approchée par la formule suivante :

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\left(\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right) \times \ln \left(\frac{r_1}{r_b} \right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{2(r_1^2 - r_b^2)} \right)$$

Où λ est la conductivité du terrain, r_1 est le rayon du cylindre équivalent associé à une sonde, r_b est le rayon d'une sonde.

Le cylindre équivalent à une section S égale à la surface du carré associé à la sonde, donc :

$$S = \pi \cdot r_1^2 = B^2 \Rightarrow r_1 = \frac{B}{\sqrt{\pi}}$$

Sous l'action d'une puissance linéique q (en W/m), pour une sonde la différence entre la température moyenne du fluide à l'intérieur de la sonde T_f et la température moyenne du sol T_m est donc, en régime stationnaire :

$$T_f - T_m = (R_s + R_b) \cdot q$$

Le régime stationnaire est atteint lorsque la puissance q a été appliquée pendant au moins une durée t_{sta} (en secondes) :

$$t_{sta} = 0,065 \frac{B^2 C_v}{\lambda}$$

¹⁵ – La méthode indiquée ici est issue de travaux de recherche menés à l'université de Lund, Suède (Hellstöm G. : *Ground Heat Storage, Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1991*) et mise en œuvre par la SIA (Société Suisse des Ingénieurs et Architectes) pour le dimensionnement de pieux (Do190). Elle se base sur une analyse en régime stationnaire du fonctionnement du champ de sondes.

Où λ est la conductivité du terrain, C_v la capacité thermique volumique du terrain.

Application : pour un champ de sondes double U de diamètre 160 mm ($r_b = 80$ mm) en placement quadratique dans un sol de conductivité 2 W/m·K et de capacité volumique $2,1$ MJ/m³·K tel que l'écartement B entre les sondes est de 8 mètres, on a $r_1 = 4,51$ donc $R_s = 0,26$ K·m/W. Pour une sonde de résistance thermique $R_s = 0,06$ K·m/W, si la température moyenne du sol est de 12 °C et que l'on souhaite une température en entrée de champ de sondes supérieure à 0 °C, sachant que la production consiste en une PAC fonctionnant avec un ΔT de 5 °C (donc on veut $T_f > 2,5$ °C), il faut que q soit inférieur à 30 W/m.

Pour 30 W/m, la température moyenne du fluide de $2,5$ °C est atteinte au bout de 50 jours.

Ceci n'est valable que pour une puissance appliquée en permanence pendant la durée t_{sta} . Dans la réalité, les intermittences vont induire des phases de repos et d'extraction.

Une alternative consiste alors à moyenner la puissance appliquée sur la période pour déterminer une puissance crête constante, qui sert à estimer le linéaire nécessaire. On utilise pour cela la puissance crête et la répartition du nombre d'heures équivalentes sur un cycle annuel.

Enfin, il est nécessaire d'évaluer la température moyenne du sol dans le champ de sondes pour appliquer le calcul. Une estimation grossière peut être faite en considérant le volume du champ de sondes, la capacité thermique volumique du sol, ainsi que la quantité d'énergie extraite pour évaluer cette température moyenne.

③ Valeurs de conductivités thermiques en fonction du type de roche (source SIA 384/6)

c.3 Paramètres caractéristiques du sol et des matériaux

Tableau 6 Paramètres caractéristiques du sol. Les valeurs sont basées sur la littérature. Sans connaissances plus précises, il faut utiliser les valeurs de calcul recommandées pour la Suisse. Dans les cas justifiés, on peut s'en écarter.

	Type de roche	Conductivité thermique λ W/(m·K)		Capacité thermique spéc. ρc MJ/(m ³ ·K)		Densité ρ 10 ³ kg/m ³
		Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	
Terrains meubles	Argile sèche	0,4 – 1,0	0,6	1,5 – 1,6	1,5	1,8 – 2,0
	Argile saturée d'eau	0,9 – 2,3	1,4	2,0 – 2,8	2,3	2,0 – 2,2
	Sable sec	0,3 – 0,8	0,5	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Sable saturé d'eau	1,5 – 4,0	2,3	2,2 – 2,8	2,4	1,9 – 2,3
	Gravier/pierres, sec	0,4 – 0,5	0,4	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Gravier/pierres, saturé d'eau	1,6 – 2,0	1,7	2,2 – 2,6	2,3	1,9 – 2,3
	Moraine compacte	1,7 – 2,4	1,8	1,5 – 2,5	2,0	1,9 – 2,5
	Tourbe	0,2 – 0,7	0,4	0,5 – 3,8	1,6	0,5 – 0,8
Roches sédimentaires	Roche molassique suisse	voir tableau 7		1,8 – 2,6	2,1	2,4 – 2,7
	Argilite	1,1 – 3,5	1,9	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,6
	Grès		2,3	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Conglomérat/brèche	1,3 – 5,1	2,6	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Roche marneuse	1,5 – 3,5	2,1	2,2 – 2,3	2,2	2,3 – 2,6
	Roche calcaire	2,5 – 4,0	2,8	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,7
	Roche sulfatée (anhydrite, gypse)	1,3 – 2,8	1,6		2,0	
Roches de fond magmatiques	Granite	2,1 – 4,1	2,8	2,1 – 3,0	2,4	2,4 – 3,0
	Diorite	2,0 – 2,9	2,3		2,7	2,9 – 3,0
	Gabbro	1,7 – 2,5	2,0		2,6	2,8 – 3,1
Roches de fond métamorphes	Schistes argileux	1,5 – 2,6	1,9	2,2 – 2,5	2,3	2,4 – 2,7
	Marbre	1,3 – 3,1	1,9		2,0	2,5 – 2,8
	Quartzite	5,0 – 6,0	5,3		2,1	2,5 – 2,8
	Micaschistes	1,5 – 3,1	2,0	2,2 – 2,4	2,3	2,4 – 2,7
	Gneiss	1,9 – 4,0	2,6	1,8 – 2,4	2,0	2,4 – 2,7
	Amphibolite	2,1 – 3,6	2,6	2,0 – 2,3	2,1	2,6 – 2,9
Matériaux divers	Mélange de ciment/bentonite (remplissage durci)		0,8		3,0	1,2
	Béton	0,9 – 2,0	1,4		1,8	2,0 – 2,42
	Glace (-10 °C)		2,32		1,87	0,91
	Polyéthylène (PE100)		0,4		1,63	0,96
	Air (0 °C – 20 °C)		0,02		0,0012	0,00124
	Acier		60,0		3,12	7,8
	Eau (10 °C)		0,6		4,15	0,99

Pour en savoir plus

- Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM
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 Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL)
- 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

■ Annulaire (Espace dit)

Au niveau d'une sonde géothermique verticale, l'espace dit « annulaire » concerne le volume à combler situé entre les tubes de sonde et le terrain naturel.

■ 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.

■ Atelier de forage

Ensemble du matériel permettant de réaliser les travaux de forage.

■ 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.

■ Boucle de sonde (tube)

Dispositif inséré dans l'ouvrage (sonde géothermique verticale) permettant de prélever ou restituer les calories du sous-sol, de les transporter par circulation du liquide caloporteur (en circuit fermé) et/ou de les restituer à la pompe à chaleur. La boucle de sonde est constituée par les différents éléments et matériaux constitutifs assemblés (pieds de sonde, tubes, soudures, etc.). Sa conception peut se décliner sous différentes géométries (U, coaxiale, etc.).

À ce jour, les géométries de boucle les plus couramment utilisées en France sont la sonde double-U et la sonde coaxiale. Les matériaux constitutifs seront conformes à la norme NF X10-960. En France, le polyéthylène haute densité (PEHD 100) est couramment utilisé.

■ 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).

■ **Capteurs verticaux**

Le terme capteur est couramment utilisé pour désigner l'échangeur enterré qui prélève l'énergie dans le sol. Un capteur vertical est appelé ici sonde géothermique verticale.

■ **Champ de sondes**

Il s'agit d'un ensemble de plusieurs sondes géothermiques verticales (généralement supérieur à cinq sondes) de profondeurs comprises entre 30 mètres à 350 mètres disposées sous un habitat à chauffer ou à côté. Le nombre, l'espacement et la profondeur des sondes sont dimensionnés par le bureau d'étude spécialisé. Les conduites de chaque sonde se rejoignent à un ou plusieurs collecteur(s) qui alimente(nt) une ou plusieurs pompe(s) à chaleur.

■ **Cimentation ou cimentation totale**

La cimentation ou injection de laitier est le remplissage du volume du forage qui permet le scellement et l'étanchéité de la boucle de sonde, sur la totalité de la hauteur du forage. Elle est réalisée sous pression, par méthode ascendante à l'aide d'un tube perdu par injection du coulis de remplissage depuis la base du forage jusqu'à la cote d'environ -1 mètre du terrain naturel.

■ **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 en été comme hiver, ainsi que la qualité d'air en termes de filtration et d'humidité relative.

■ **Diagraphie**

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

■ **Echangeur géothermique vertical**

(appelé parfois échangeur enterré, capteur vertical).

■ **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**

(terme d'usage – voir la définition de la sonde géothermique verticale).

■ **Forage artésien**

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

■ **Foration (terme d'usage)**

Action (stricte) de forer un trou avec un outil adapté, sans connotation avec l'ouvrage réalisé.

■ **Geocooling (free cooling)**

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

■ **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.

■ **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.

■ **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.

■ **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.

■ Périmètre 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.

■ Pieu énergétique (géosstructure)

Pieu de fondation équipé d'échangeur de chaleur.

■ Pompe à chaleur (PAC)

Dispositif thermodynamique qui prélève la chaleur présente dans un milieu (par exemple air, eau ou terre) pour la transférer vers un autre (par exemple un logement pour le chauffer).

■ 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.

■ Rotary

Méthode de foration qui utilise un outil (tricône), animé d'un mouvement de rotation par les tiges de forage et de translation verticale sous l'effet du poids de la garniture de forage (tiges et masses tiges).

■ **Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical)**

Échangeur géothermique très basse énergie qui permet de prélever ou d'injecter au sous-sol de la chaleur. Son usage, en liaison avec la PAC, peut être le chauffage ou la climatisation (PAC réversible), mais également le refroidissement (geocooling) par by-pass de la PAC. La sonde géothermique verticale est constituée d'un forage vertical de plusieurs dizaines de mètres de profondeur, dans lequel est insérée une boucle de sonde, raccordée à une pompe à chaleur. Un fluide caloporteur circule à l'intérieur des tubes, en circuit fermé, pour prélever ou restituer l'énergie du sous-sol, la transporter et la restituer à la pompe à chaleur.

■ **Tricône**

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

■ **Tube de sonde**

Tubes constituant la boucle de sonde.

■ **Tubage plein**

Tubage non ajouré mis en place dans un forage. Ce type de tubage peut permettre d'obtenir 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 2 batterie(s) d'échange air / eau (« 2 tubes » ou « 4 tubes ») et éventuellement d'une batterie électrique.

Bibliographie

- NF X10-970 janvier 2011 Forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) – Réalisation, mise en œuvre, entretien, abandon
- Syndicat des Tubes et Raccords en PE (STR-PE)
<http://www.strpe.org/raccor.html>
- SN 546 384/6 – SIA 384/6:2010 Norme suisse – Sondes géothermiques

