

Pompes à chaleur

Planification | Optimisation | Fonctionnement | Entretien



**Groupement promotionnel suisse
pour les pompes à chaleur GSP**



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

Impressum

Editeur: Office fédéral de l'énergie,
Domaine formation et perfectionnement

Auteurs: Peter Kunz (Coordination),
Prof. Dr Thomas Afjei, Prof. Werner
Betschart, Peter Hubacher, Rolf Löhner,
Andreas Müller, Vladimir Prochaska

Révision: Othmar Humm

Traduction: Ilsegret Messerknecht

Mise en page: Christine Sidler

Figures: Benjamin Magnin

Le contenu exhaustif de ce cahier
est disponible sur le site
www.bfe.admin.ch

Tous droits réservés OFEN.



SVK Schweizerischer Verein
für Kältetechnik

**VSEI
USIE**


suissetec

s i a



Contenu		
Une technologie-clé	3	
1.		
Bases de la technique des PAC	5	
1.1 Limites du système et valeurs caractéristiques	5	
1.2 Grandeurs de processus	6	
1.3 Diagramme log p,h	6	
1.4 Cycle de fonctionnement	7	
1.5 Cycle de Carnot	8	
2.		
Éléments d'une pompe à chaleur	9	
2.1 Compresseur	9	
2.2 Echangeur de chaleur	11	
2.3 Détendeur	13	
2.4 Dispositifs de sécurité	14	
2.5 Autres composants	15	
2.6 Dispositifs de dégivrage	15	
2.7 Types de pompes à chaleur	17	
2.8 Autres systèmes	17	
3.		
Fluide réfrigérant	19	
3.1 Propriétés	19	
3.2 Choix du fluide réfrigérant	20	
3.3 Effet de serre et indice de réchauffement climatique global (TEWI)	21	
4.		
Sources de chaleur	23	
4.1 Air extérieur	23	
4.2 Géothermie	25	
4.3 Eaux souterraines	29	
4.4 Eaux de surface	32	
4.5 Rejets thermiques	33	
4.6 Refroidissement de bâtiments	35	
5.		
Distribution de chaleur	37	
5.1 Chauffage à eau chaude	37	
5.2 Installations de climatisation	41	
5.3 Production d'eau chaude sanitaire	41	
5.4 Autres systèmes	43	
6.		
Intégration dans les installations techniques	45	
6.1 Principes	45	
6.2 Modes de fonctionnement	45	
6.3 Système hydraulique	48	
6.4 Circulateurs	51	
7.		
Acoustique et protection contre le bruit	53	
7.1 Valeurs limites légales	53	
7.2 Mesures de réduction du bruit	54	
8.		
Planification	57	
8.1 Approvisionnement en électricité	57	
8.2 Centrale de chauffe	58	
8.3 Rentabilité	59	
8.4 Contrôle des résultats	60	
9.		
Mise en service	61	
9.1 Phase avant la mise en service	61	
9.2 Préparation de la mise en service	61	
9.3 Source de chaleur et distribution de chaleur	62	
9.4 Mise en service de la pompe à chaleur	62	
9.5 Procès-verbal de mise en service	63	
9.6 Instructions de service	63	
9.7 Procès-verbal de réception	64	
10.		
Exploitation	65	
10.1 Exploitation et contrôle des résultats	65	
10.2 Surveillance de l'exploitation	65	
10.3 Maintenance	65	
10.4 Optimisation d'exploitation	66	
10.5 Dysfonctionnement et réparation	66	
11.		
Exemples concrets	67	
Auteurs	79	

Une technologie-clé

Le potentiel d'utilisation de la chaleur à faible valeur énergétique pour le chauffage de locaux et l'eau chaude sanitaire est énorme. Ce type de chaleur existe en effet à peu près partout, qu'il s'agisse de chaleur rejetée, de chaleur ambiante ou de chaleur géothermique à faible profondeur. Son seul inconvénient est son bas niveau de température, qui empêche souvent son utilisation directe. Toutefois, la mise en œuvre d'un cycle thermodynamique permet de pallier ce défaut. Ainsi, la pompe à chaleur classique constitue une technologie-clé pour l'utilisation des énergies renouvelables. C'est pourquoi Suisse-Energie souhaite promouvoir ce type de production de chaleur utile.

Une pompe à chaleur doit être motorisée. Mais l'amélioration des conditions de fonctionnement permet de diminuer le gradient de température entre la source de chaleur et la chaleur dégagée, et donc les coûts de fonctionnement. En premier lieu, il faut mentionner l'amélioration de la qualité des bâtiments: une maison bien isolée équipée d'un chauffage au sol est idéale pour l'utilisation d'une pompe à chaleur. Des progrès ont également été réalisés dans la localisation et l'exploitation des rejets de chaleur, de la géothermie et des eaux de surface.

Le fonctionnement même de la pompe à chaleur, déjà écologique en soi, peut encore être amélioré. L'utilisation d'électricité produite au moyen de ressources renouvelables, voire d'électricité écologique certifiée, permet de faire des pompes à chaleur des outils d'approvisionnement énergétique durable. Ceci est particulièrement vrai lorsque les pompes à chaleur sont mises en œuvre dans des bâtiments de construction écologique et à haute efficacité énergétique.

Dans le cadre du programme de formation et de perfectionnement de la Confédération et des cantons dans le domaine de l'énergie, le document «Pompes à chaleur: Planification, optimisation, fonctionnement et entretien» constitue une initiative bienvenue pour la diffusion des connaissances sur le fonctionnement et les caractéristiques de ces outils de production de chaleur écologique à l'intention d'un large public spécialisé. Les auteurs de ce document, ainsi que l'Office fédéral de l'énergie qui en est l'éditeur, espèrent qu'il suscitera un vif intérêt.

Office fédéral de l'énergie, domaine Formation et perfectionnement, Daniel Brunner

1. Bases de la technique des pompes à chaleur

1.1

Limites du système et valeurs caractéristiques

Les limites du système et les valeurs caractéristiques sont définies comme suit:

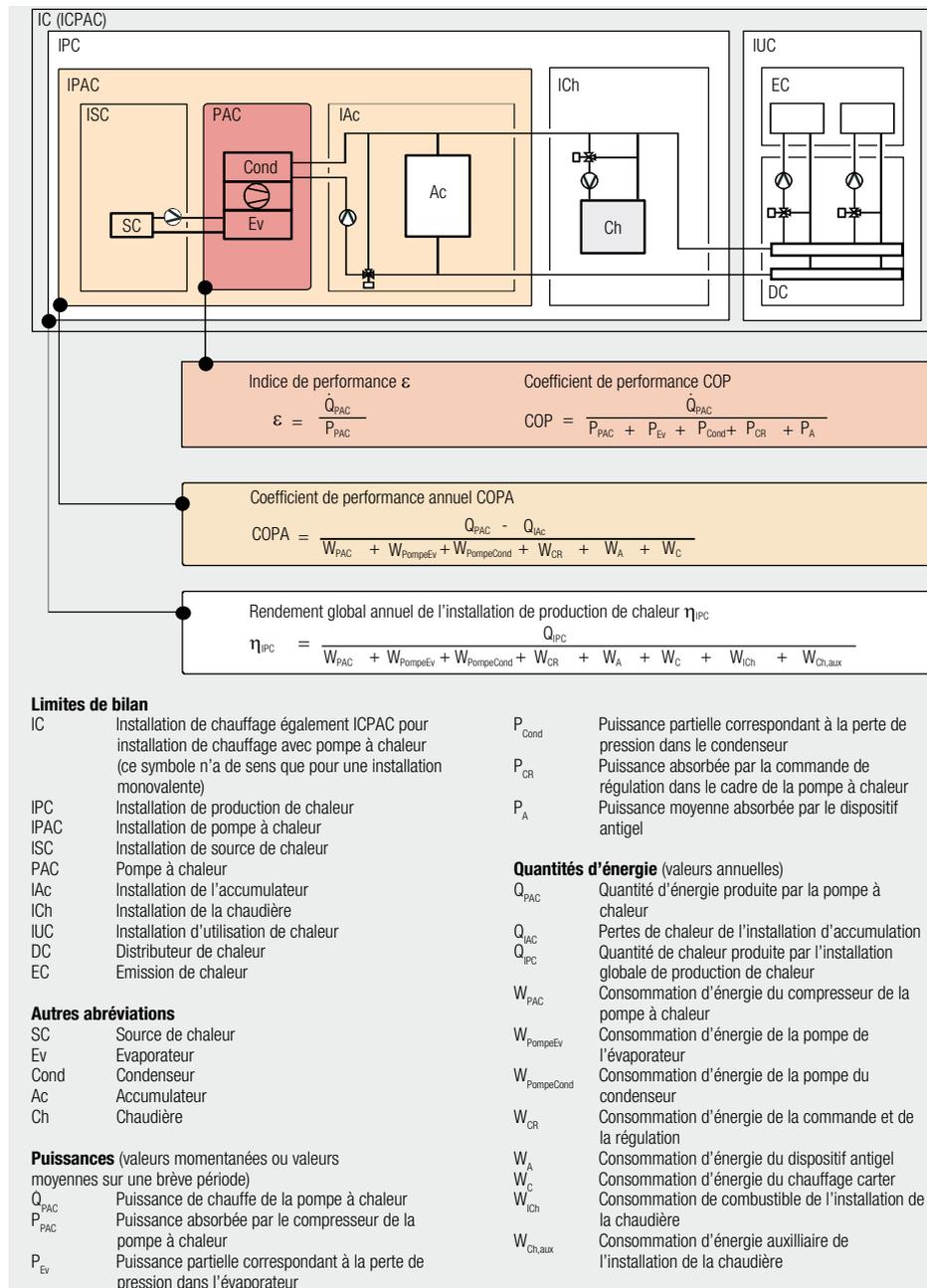


Figure 1.1: Limites du système et valeurs caractéristiques des pompes à chaleur

1.2 Grandeurs de processus

Le travail et la chaleur sont des grandeurs de processus. Ces facteurs représentent les formes possibles de transport de l'énergie hors des limites du système. L'énergie E , le travail W et la chaleur Q ont pour unité le joule (J).

Énergie interne u : L'énergie interne spécifique est une grandeur d'état calorifique représentant la réserve d'énergie d'un système thermodynamique (kJ/kg).

Enthalpie h : L'enthalpie spécifique est une grandeur d'état calorifique définie par la formule $h = u + p \cdot V$.

Exergie: L'énergie comprend l'exergie et l'anergie. L'exergie est la fraction de l'énergie qui, dans un environnement donné, peut être convertie en n'importe quelle forme d'énergie (p. ex. électricité pour le compresseur).

Anergie: L'anergie est la fraction de l'énergie qui, dans un environnement donné, ne peut être convertie en n'importe quelle forme d'énergie (p. ex. la chaleur de l'environnement comme source de chaleur).

Entropie s : L'entropie caractérise l'irréversibilité et donc la dégradation de l'énergie dans un processus.

1.3 Diagramme log p,h

Le diagramme log p,h permet de représenter clairement le cycle de fonctionnement. Les états et modifications d'état du fluide réfrigérant peuvent également être déduits du tableau des pressions du fluide en question.

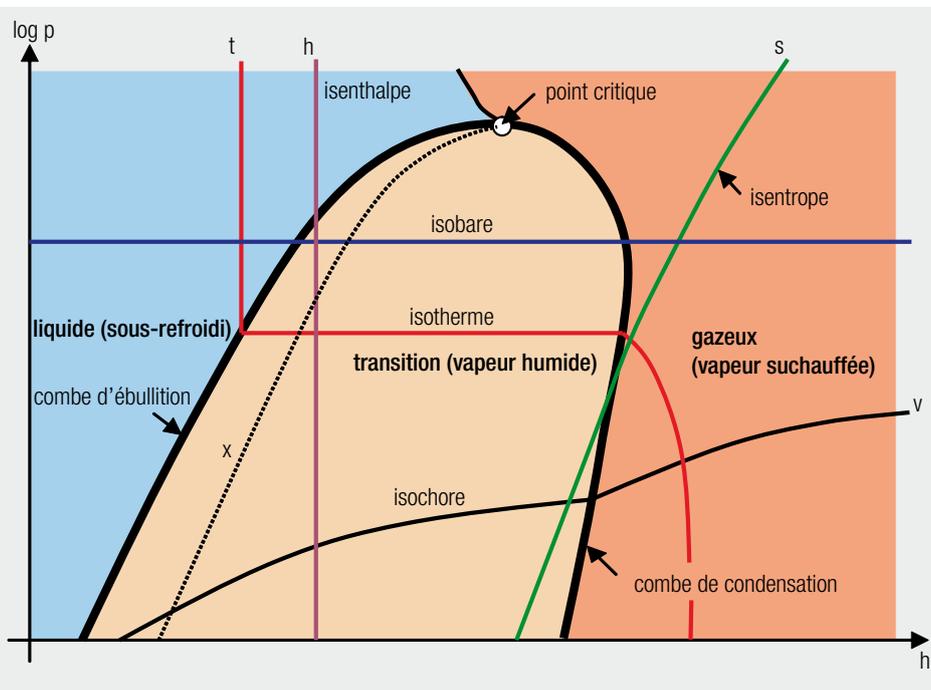


Figure 1.2: Variation des grandeurs d'état physiques dans le diagramme log p,h

1.4 Cycle de fonctionnement

Actuellement, la technique la plus fréquemment mise en œuvre dans les pompes à chaleur repose sur le procédé de compression de vapeur froide. Un fluide réfrigérant s'évapore dans la partie froide lors de l'absorption d'une quantité aussi grande que possible de chaleur d'évaporation. Après avoir été comprimé dans un compresseur, ce fluide est à nouveau liquéfié dans la partie chaude; ce faisant,

le fluide dégage de la chaleur de condensation. Ensuite, le fluide est ramené à la pression d'évaporation au moyen d'un détendeur. Toutes les installations basées sur ce principe fonctionnent grâce au fait que les températures d'évaporation et de condensation sont fonction de la pression exercée sur le fluide frigorigène. Une telle installation peut être représentée de façon simplifiée comme dans la figure 1.3.

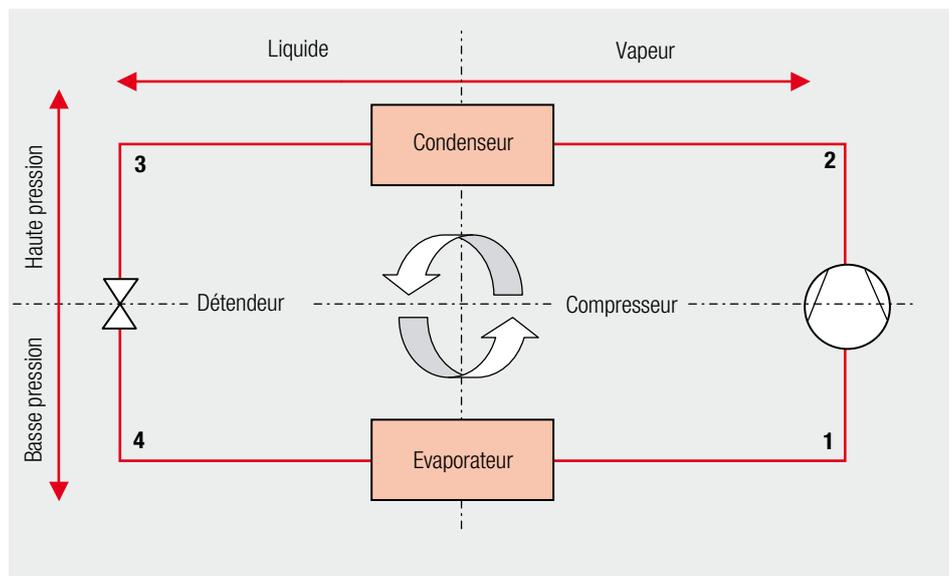


Figure 1.3: Principe du procédé de compression de vapeur froide

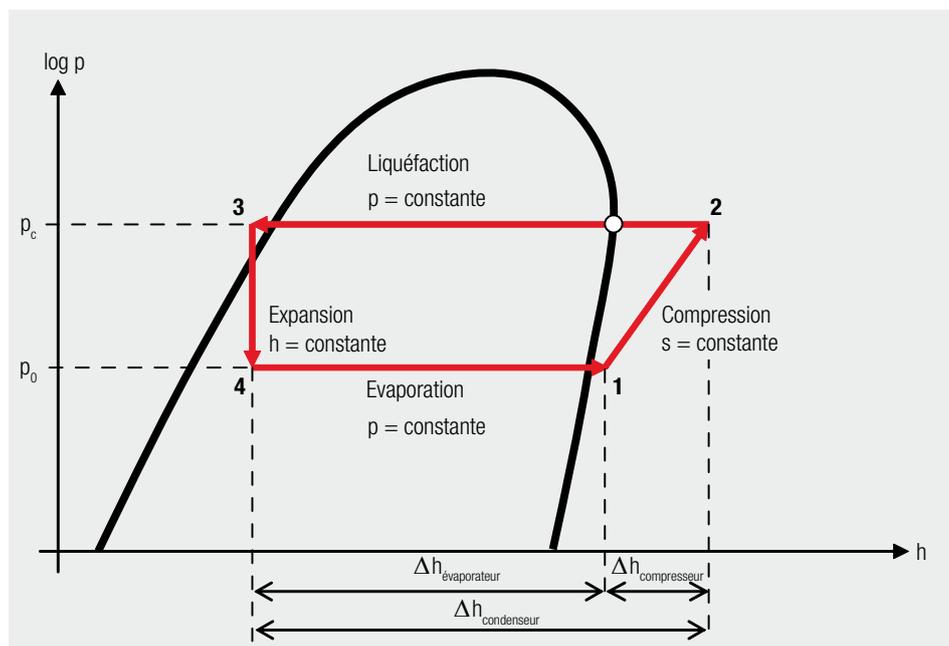


Figure 1.4: Le processus sans perte dans le diagramme $\log p, h$

1.5

Cycle de Carnot

Le rendement idéal est donné par le cycle de Carnot; il s'agit d'un cycle n'ayant aucune perte, sans surchauffe ni sous-refroidissement. Pour le cycle de Carnot la caractéristique de puissance ε_{cw} s'obtient comme suit:

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{W_{PAC}} = \frac{T_c}{T_c - T_o}$$

\dot{Q}_{PAC} puissance thermique en kW

W_{PAC} puissance amenée en kW

T_o température d'évaporation en K

T_c température de condensation en K

Pour un cycle véritable (réel), on obtient la caractéristique de puissance ε_w suivante:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{P_{PAC}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

P_{PAC} puissance amenée en kW

\dot{Q}_{PAC} puissance thermique en kW

h_1 enthalpie du fluide réfrigérant à l'entrée du compresseur en kJ/kg

h_2 enthalpie du fluide réfrigérant à la sortie du compresseur en kJ/kg

h_3 enthalpie du fluide réfrigérant à la sortie du condenseur en kJ/kg

Le rapport entre la caractéristique de puissance réelle et la caractéristique de puissance de Carnot est appelée efficacité η_{cw} (exergétique).

$$\eta_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

2. Éléments d'une pompe à chaleur

Les quatre composants principaux indispensables à la réalisation d'un cycle à compression de vapeur froide traditionnel sont:

- le compresseur
- le condenseur
- le détendeur (vanne de détente)
- l'évaporateur

2.1 Compresseur

Le compresseur amène le gaz frigorigène en provenance de l'évaporateur à une pression suffisante pour qu'il puisse se liquéfier.

Il existe plusieurs types de compresseurs présentant des avantages ou inconvénients spécifiques en fonction des conditions d'utilisation ou de l'application souhaitée.

Types de compresseurs

Le tableau 2.1 se limite aux compresseurs fréquemment utilisés dans les pompes à chaleur. Le tableau ne mentionne pas les compresseurs à ailettes, à palettes, et à pistons rotatifs.

Modèles

On distingue trois modèles de compresseurs selon leur application, et en tenant compte des coûts respectifs.

Compresseur ouvert: Le moteur et le compresseur sont des ensembles distincts. L'arbre d'entraînement du compresseur sort du carter et est relié au moteur soit directement soit par le biais d'une courroie trapézoïdale; la traversée du carter par l'arbre doit être étanche aux gaz. La motorisation peut être électrique mais également à combustion.

Type de compresseur	à pistons alternatifs	à spirale (Scroll)	à vis	turbo
Principe de fonctionnement	compression	compression	compression	flux de fluide
Compression	statique	statique	statique	dynamique
Cylindrée	géométrique	géométrique	géométrique	dépendant de la contre-pression
Admission	à pulsations	constante	constante	constante
Débit volumique (plage)	à 1000 m ³ /h	à 500 m ³ /h	100 à 10000 m ³ /h	100 à 50000 m ³ /h
Puissance de chauffe (plage à B0/W35)	à 800 kW	à 400 kW	80 à 8000 kW	80 à 40000 kW
Rapport de pression en règle générale (à 1 allure)	à 10	à 10	à 30	à 5
Régulation à vitesse de rotation constante	par palier	difficile	sans palier	sans palier
Régulation de la vitesse de rotation	possible	possible	possible	possible
Sensibilité aux coups de liquide	élevée	faible	faible	faible
Production de vibrations	oui	non	non	non

Tableau 2.1: Types de compresseurs



Figure 2.1: Compresseur hermétique spiral (Scroll)
(Photo: Copeland)

Compresseur semi-hermétique: Le moteur et le compresseur forment un ensemble. L'arbre d'entraînement est relié au moteur, sous le carter. Le refroidissement du moteur électrique se fait soit au moyen du gaz frigorigène aspiré soit à travers le carter (eau ou air).

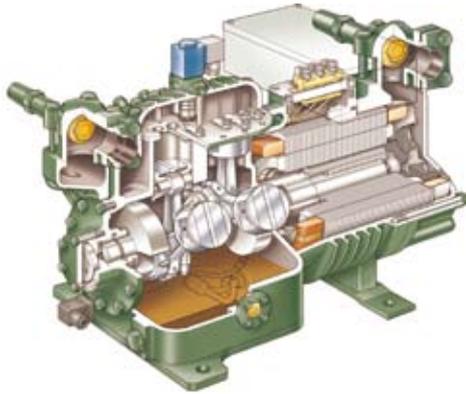


Figure 2.2: Compresseur semi-hermétique à pistons alternatifs
(Photo: Bitzer)

Compresseur hermétique: Le moteur et le compresseur forment un ensemble. Contrairement au modèle semi-hermétique, le compresseur hermétique est monté dans un carter fermé, soudé de manière parfaitement étanche. Le moteur est généralement refroidi au moyen du gaz frigorigène aspiré. En cas de panne, il faut remplacer tout le compresseur.

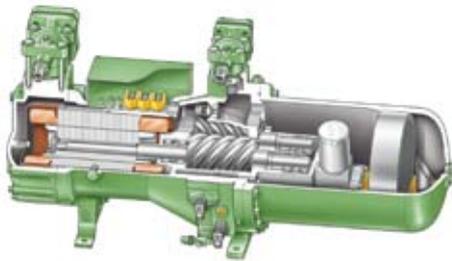


Figure 2.3: Compresseur semi-hermétique à vis
(Photo: Bitzer)

Compresseurs exempts d'huile: Ces compresseurs, qu'ils soient ouverts, semi-hermétiques ou hermétiques, sont munis de roulements spéciaux, de sorte qu'ils ne requièrent aucune lubrification à l'huile. Comme aucune huile ne circule dans le circuit frigorigène, le principal avantage de ces compresseurs est de résoudre le problème de l'évacuation de cette huile hors du système, ce qui présente un avantage important dans le cas d'évaporateurs en système immergé ou de systèmes interconnectés (plusieurs compresseurs par circuit).

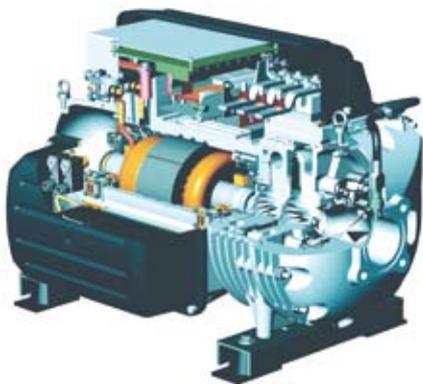


Figure 2.4: Compresseur semi-hermétique turbo (exempt d'huile)
(Photo: Turbocor)



Figure 2.5: Compresseur ouvert à pistons alternatifs (version industrielle)
(Photo: Grasso)

2.2

Echangeur de chaleur

Évaporateur

L'évaporateur prélève la chaleur de l'environnement (air, eau, saumure, etc.). Cette chaleur est absorbée par le fluide réfrigérant, qui, de ce fait, s'évapore. La chaleur est donc transférée de la source de chaleur au fluide réfrigérant.

Il faut en principe faire une distinction entre l'évaporation sèche et l'évaporation en système immergé; il existe cependant des systèmes combinant ces deux variantes.

Évaporation sèche: Le fluide réfrigérant est amené vers l'évaporateur par une vanne de détente. Le débit de fluide réfrigérant est régulé par la différence entre la température du gaz et la température de saturation (surchauffe du gaz aspiré). Le gaz frigorigène est surchauffé et donc «sec» à la sortie de l'évaporateur.

Évaporation en système immergé: Le fluide réfrigérant est introduit dans l'évaporateur par le biais d'une régulation à flotteur haute pression ou basse pression. La quantité de fluide réfrigérant est réglée par le biais du niveau de liquide du côté haute pression ou basse pression. Le gaz frigorigène n'est pratiquement pas surchauffé à la sortie de l'évaporateur, et est donc «humide». C'est pourquoi il y a gé-

néralement lieu de prévoir un séparateur de liquide afin de protéger le condenseur des coups de liquide. L'avantage principal de l'évaporateur en système immergé réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des différences minimales de température entre le fluide réfrigérant et la source de chaleur, c'est-à-dire que la température d'évaporation peut être prévue plus élevée, ou augmente davantage dans la plage de charge partielle. Il s'en suit un meilleur rendement du système.

Condenseur

Le condenseur sert à désurchauffer, liquéfier et sous-refroidir le gaz frigorigène provenant du compresseur, qui dégage alors de la chaleur en faveur des installations destinées à l'utiliser.

La chaleur peut également être dégagée par plusieurs échangeurs de chaleur, à des niveaux de température différents. Cette application équipée d'un désurchauffer, condenseur et sous-refroidisseur devient vraiment rentable dans les installations de grande taille ainsi que dans les systèmes présentant de grandes différences de température entre l'entrée et la sortie du médium, comme par exemple le chauffage à distance, l'eau chaude sanitaire ou des applications industrielles.

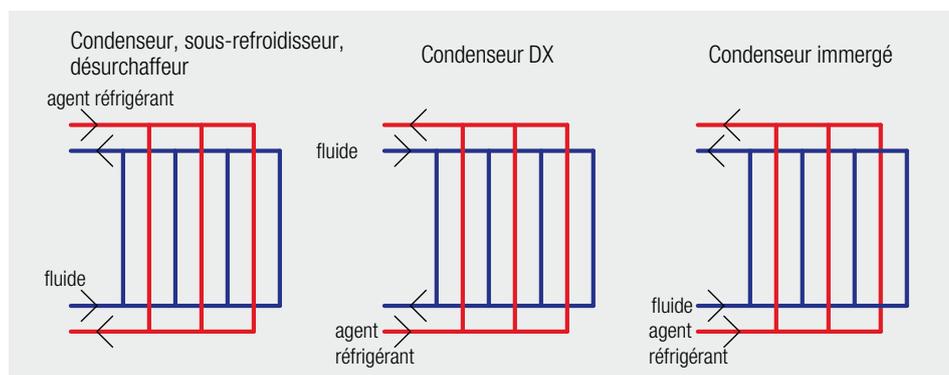


Figure 2.6: Schéma d'un échangeur de chaleur à plaques



Figure 2.7: Échangeur de chaleur à plaques (Photo: BMS)



Figure 2.8: Échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires (Photo: Bitzer)



Figure 2.9: Échangeur de chaleur coaxial (Photo: Wieland)

Types

Les échangeurs de chaleur à plaques sont une construction compacte en exécution soudée ou fermée hermétiquement pour la transmission de la chaleur de milieux liquides ou gazeux (applications spécifiques). Les appareils à plaques présentent l'avantage d'avoir des contenances réduites, de grandes surfaces d'échange pour un encombrement limité, et une grande modularité dans la fabrication. Ils conviennent pour une évaporation sèche ou en système immergé.

Les échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires constituent l'exécution classique réalisée au moyen d'un registre tubulaire et d'un corps de chaudière pour la transmission de la chaleur de milieux liquides, ou gazeux dans certains cas particuliers. Les appareils à faisceaux tubulaires se caractérisent par une grande diversité des matériaux employés, une bonne résistance à l'encrassement et au gel, et une régulation plutôt lente. Ils conviennent pour une évaporation sèche ou en système immergé; toutefois, la variante en système immergé requiert une quantité de fluide réfrigérant nettement plus importante.

Les échangeurs de chaleur coaxiaux assurent l'échange de chaleur par le biais d'un tube double cintré en spirale, géné-

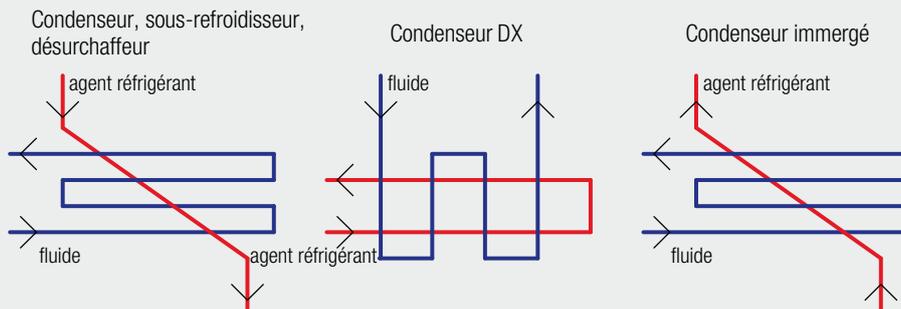


Figure 2.10: Schéma d'un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires

ralement en cuivre ou en acier inoxydable. Ils sont utilisés dans des installations de très petite taille, ou pour des raisons liées à une technique de construction spécifique.

Les échangeurs de chaleur à registre sont constitués de serpentins ou de blocs de plaques de matériaux de qualités différentes, intégrés dans des réservoirs ouverts ou fermés ainsi que dans des environnements fixes. Ils sont généralement employés dans des milieux fortement pollués (eaux usées, terre, etc.).

Les échangeurs de chaleur à lamelles sont principalement constitués de tubes isolés ou multiples disposés en parallèle, sur lesquels sont pressés des lamelles. Ils conviennent pour la transmission de la chaleur de milieux gazeux (p. ex. air). Plusieurs combinaisons de matériaux et plusieurs circuits sont possibles. Une grande attention est à porter à la distance

optimale entre les lamelles, étant donné que l'encrassement, le givrage, etc. sont susceptibles de réduire considérablement le rendement de ce type d'appareil. Lorsque la température de l'air descend en dessous de 5 °C environ, l'échangeur de chaleur se couvre de givre et de glace, qu'il faut dégeler, ce qui réduit fortement son efficacité (voir chapitre 2.6)

2.3 Détendeur

Le détendeur réduit la pression exercée sur le fluide réfrigérant lorsqu'il passe du côté haute pression au côté basse pression du circuit frigorigène. Il régule également le flux du fluide réfrigérant en direction de l'évaporateur.

Types de détendeurs

Les vannes d'expansion régulent le flux du fluide réfrigérant en direction de l'évaporateur en utilisant la surchauffe du gaz aspiré à la sortie de l'évaporateur



Figure 2.11: Échangeur de chaleur à registre (bloc de plaques) (Photo: Omega)

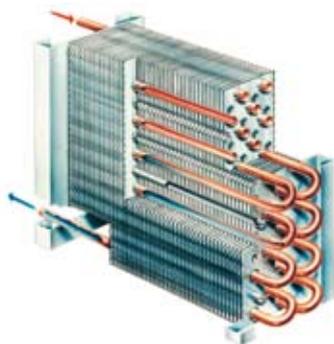


Figure 2.12: Échangeur de chaleur à lamelles (batterie sans ventilateur, carrosserie, etc.) (Photo: Günter)



Figure 2.13: Vanne d'expansion thermostatique (Photo: Danfoss)

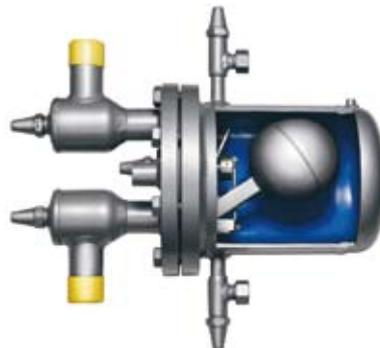


Figure 2.14: Régulateur à flotteur haute pression (Photo: TH-Witt)

teur; elles sont exclusivement employées dans les systèmes à évaporation sèche. Il faut distinguer les vannes d'expansion **thermostatiques**, à compensation de la pression interne ou externe, des vannes d'expansion **électroniques**. L'avantage principal du modèle électronique est qu'une surchauffe du gaz aspiré n'est pas nécessaire, alors qu'une surchauffe minimale est obligatoire pour les vannes thermostatiques; d'autre part, sa plage de fonctionnement est plus grande que celle du modèle thermostatique. Le modèle électronique fonctionne de manière optimale dans des conditions de service différentes ainsi qu'en charge partielle.

Les **régulateurs à flotteur haute pression** régulent le flux du fluide réfrigérant vers l'évaporateur en fonction du niveau du fluide du côté haute pression du flotteur. Les régulateurs à flotteur haute pression ne doivent pas être réglés et assurent une régulation très stable dans toute l'installation.

Les **régulateurs à flotteur basse pression** fonctionnent de manière analogue aux régulateurs haute pression. Toutefois, ils régulent le flux de fluide réfrigérant en fonction du niveau de fluide dans l'évaporateur.

Il existe également des modèles électroniques de régulateur à flotteur.

2.4

Dispositifs de sécurité

Un certain nombre de dispositifs de sécurité sont nécessaires pour que les appareils et leurs composants, les conduites, et les différents fluides employés ne soient pas soumis à des contraintes trop sévères. Le type et la forme de ces dispositifs sont fixés par le législateur en fonction de la taille et du lieu d'implantation de l'installation, des fluides réfrigérants utilisés, etc. Les principaux dispositifs de sécurité sont les suivants:

- **Le limiteur de pression** ou le **pressostat haute pression** (coupure du système en cas d'augmentation trop forte de la pression) est destiné à protéger le compresseur et tous les composants haute pression. A partir d'une certaine taille de compresseur ou d'installation, cet appareil devra obligatoirement fonctionner de manière mécanique et couper directement l'alimentation électrique du contacteur principal.
- **Basse pression:** Coupure du système en cas de diminution de la pression afin de protéger le compresseur et tous les composants basse pression.
- **Pressostat pour pression différentielle d'huile:** Coupure du système en cas de diminution de la pression différentielle afin de contrôler la lubrification du compresseur.
- **Surchauffe du gaz sous pression:** Coupure du système en cas d'augmentation de la température afin de contrôler la température du gaz chaud.
- **Protection antigel:** Coupure du système en cas de diminution de la température afin de protéger l'évaporateur contre le gel.
- **Ecoulement:** Coupure du système en cas de diminution du débit d'écoulement secondaire afin de protéger

l'évaporateur contre l'encrassement ou le givrage et le condenseur et le désurchauffeur contre la surchauffe.

- **Protection des enroulements, Klixon, thermique et protection du moteur** afin de protéger les moteurs électriques (compresseur, ventilateurs, pompes, etc.)
- **Soupapes de sécurité, disques de rupture, sections de rupture, etc.**, afin de protéger le système contre les pressions trop importantes en fonctionnement ou à l'arrêt (p. ex. en cas d'incendie).
- **Contrôle du niveau, du fluide réfrigérant, etc.** afin de contrôler la quantité de fluide réfrigérant (débordement, fuites, déplacements, etc.).

2.5

Autres composants

Les composants et appareils suivants sont indispensables ou à tout le moins utiles pour le bon fonctionnement de l'installation:

Déshydrateur-filtre pour capter l'humidité résiduelle dans le système de refroidissement. Cette humidité peut provoquer le givrage du détendeur, des modifications de la qualité des fluides et des dégâts à l'enroulement.

Regard avec indicateur d'humidité pour le contrôle visuel de l'humidité dans le système ainsi que la production de flashgas (formation de bulles de gaz) comme indice d'un manque de fluide réfrigérant, d'encrassement du déshydrateur-filtre, etc.

Filtre aspirant pour la protection mécanique du compresseur.

Electro-aimant pour le déclenchement ou la commutation automatique ou l'aspiration des différents échangeurs de chaleur.

Régulateur de pression pour le maintien en pression constante, haute ou basse des différentes parties du système.

Absorbeur de vibrations pour le débrayage des parties vibrantes, p. ex. le compresseur.

Silencieux pour le gaz sous pression pour amortir les pulsations du gaz dans les compresseurs à piston.

Collecteur de fluide réfrigérant pour recueillir le fluide réfrigérant lors de différents états opérationnels ou de l'aspiration.

Séparateur d'huile pour éviter les dépôts d'huile importants dans le système et de souiller l'évaporateur avec de l'huile. Utilisé dans le cas de compresseurs à vis, d'installations à plusieurs compresseurs ou d'évaporateurs en système immergé.

Vannes d'arrêt et instruments de mesure pour l'entretien habituel et le contrôle des installations (vannes schrader).

2.6

Dispositifs de dégivrage

Les échangeurs de chaleur à lamelles peuvent givrer ou geler lorsque la température de l'air est basse, de sorte que l'échange de chaleur risque d'être de plus en plus mauvais. C'est pourquoi il est indispensable de pouvoir dégivrer la surface de contact lorsque cela s'avère nécessaire.

Les deux systèmes de dégivrage les plus efficaces pour les pompes à chaleur air-eau sont les suivants:

By-pass gaz chauds (figure 2.15)

Pendant le processus de dégivrage, le condenseur est contourné au moyen d'une soupape de by-pass, et le gaz sous pression provenant du compresseur est

directement envoyé vers l'évaporateur. Il est ici très important que la pression soit maintenue élevée en aval du compresseur. La puissance nécessaire pour le dégivrage correspond pratiquement à la puissance électrique absorbée par le compresseur.

Figure 2.15: Schéma de principe pour le dégivrage d'un by-pass gaz chauds

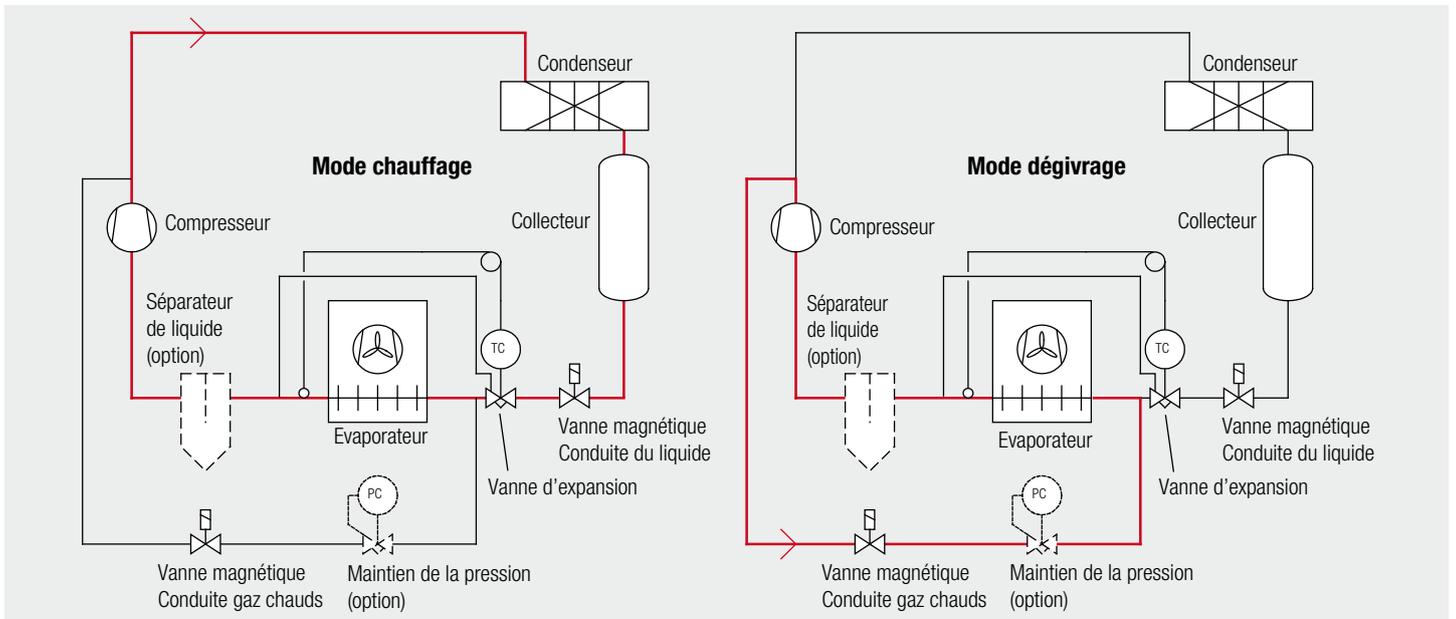
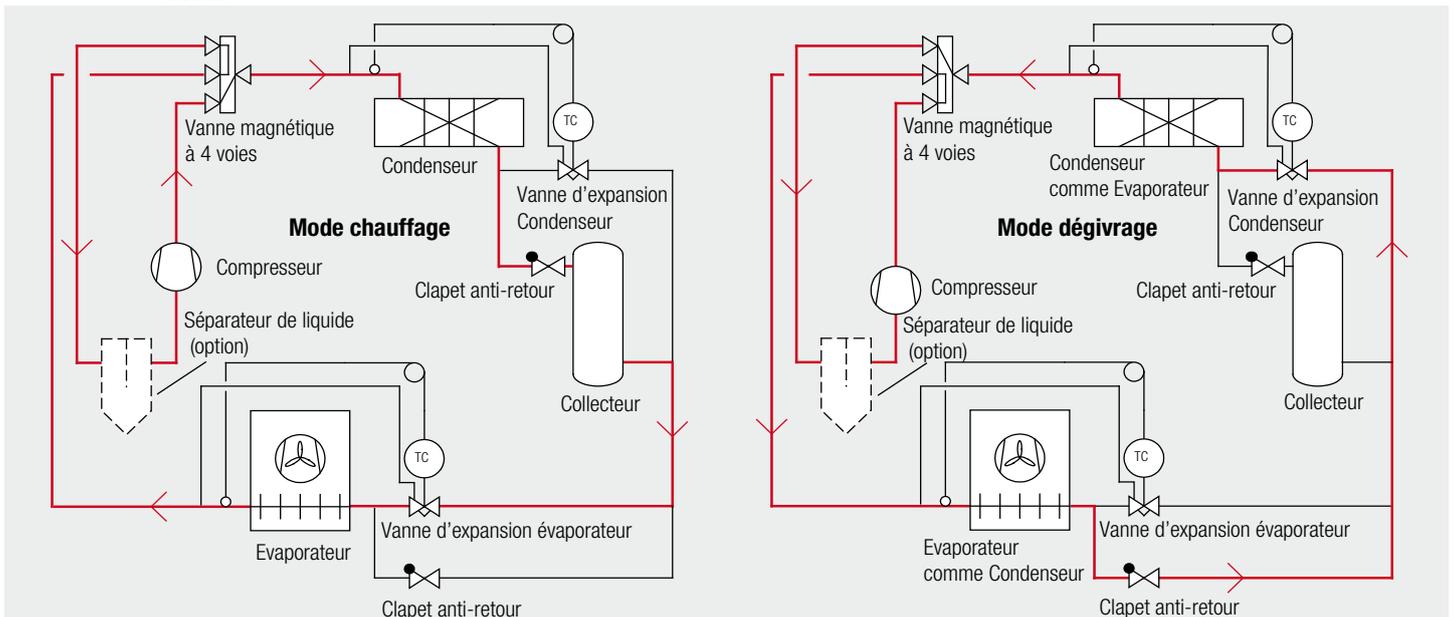


Figure 2.16: Schéma de principe d'un cycle inversé



Dégivrage par inversion du cycle (fig. 2.16)

Le cycle est inversé au moyen d'une électrovanne à 4 voies ou de combinaisons de vannes. Le condenseur sert d'évaporateur et l'évaporateur de condenseur. Il faut veiller à ce qu'une quantité suffisante d'énergie soit disponible dans la partie destinée à l'utilisation de la chaleur pendant le processus de dégivrage, étant donné que ce dernier soustrait de la chaleur. La puissance nécessaire pour le dégivrage correspond à 2 ou 3 fois la puissance électrique absorbée par le compresseur.

Au-dessus de 2 °C à 3 °C environ, la solution la plus rapide et efficace pour le dégivrage de l'évaporateur est l'utilisation du ventilateur, qui peut être combinée sans problème avec toute autre méthode de dégivrage.

2.7

Types de pompes à chaleur

Dans le domaine des pompes à chaleur, on distingue:

Le modèle compact: Tous les composants sont regroupés (d'usine ou sur place) dans un seul boîtier, une salle des machines ou sur un seul châssis.

Le modèle split: Des composants de base de la pompe à chaleur se trouvent en dehors de l'élément central; par exemple l'évaporateur d'une pompe à chaleur air-eau se trouve à l'extérieur et le groupe compresseur-condenseur se trouve à l'intérieur du bâtiment.

2.8

Autres systèmes

A côté du système mettant en œuvre le cycle de vapeur froide (système à condensation); il existe encore d'autres procédés pouvant être utilisés dans les pompes à chaleur, comme par exemple les systèmes à absorption, à refroidissement thermo-électrique (effet Peltier), à cycle Stirling, à injection de vapeur froide et à gaz froid.

Toutefois, les seules pompes à chaleur effectivement commercialisées parmi ces différents types sont les systèmes à absorption. L'indice de performance de ces installations est inférieur à celui des systèmes à condensation. On utilise ce procédé principalement dans les situations où la chaleur utile (chaleur rejetée, etc.) est constamment disponible, et si possible gratuitement.

3.

Fluide réfrigérant

3.1 Propriétés

Le fluide réfrigérant est l'agent frigorigène actif mis en œuvre dans les machines à vapeur froide. On emploie souvent cette notion dans un sens général pour toutes les machines frigorifiques ou tous les procédés de production de froid, comme par exemple les pompes à chaleur.

Dans la mesure du possible, tout fluide réfrigérant devrait présenter les caractéristiques suivantes:

- bonnes propriétés thermodynamiques
- puissance frigorifique volumétrique élevée (→ petit compresseur)
- niveau de pression adapté à la plage d'utilisation (→ température critique suffisamment élevée et point de congélation suffisamment bas)
- pertes de pression due à la circulation peu importantes
- stabilité chimique et thermique
- non toxique
- non inflammable
- bonne miscibilité avec les lubrifiants
- non destructeur de l'ozone, ne provoquant pas ou quasiment pas d'effet de serre
- prix avantageux

La plupart des fluides réfrigérants sont soit nuisibles pour la couche d'ozone ou stables dans l'air, c'est-à-dire générateurs d'effet de serre, comme illustré dans la figure 3.1. Des exemples de fluides réfrigérants stables dans l'air sont le R-134a et

la série des R-404A, R-407C, R-410A, R-417A, etc. Parmi les fluides réfrigérants destructeurs de la couche d'ozone, on peut citer le R-22, R-12, R-502 et les mélanges R-401, R-402 etc. utilisés dans la maintenance. Les fluides réfrigérants autorisés en Suisse sont définis par la loi. [ChemRRV] (www.cheminfo.ch).

Pour des raisons de protection de l'environnement, il s'agit de réduire au maximum la quantité de fluides réfrigérants et d'utiliser si possible des réfrigérants naturels tels que par exemple l'ammoniac (R-717), 60 % d'ammoniac et 40 % d'oxyde de diméthyle (R-723), les hydrocarbures (R-600a, R-290), CO₂ (R-744) ou l'eau (R-718).

On distingue quatre groupes de fluides réfrigérants:

- Les CFC (hydrochlorofluorocarbures entièrement halogénés), comme

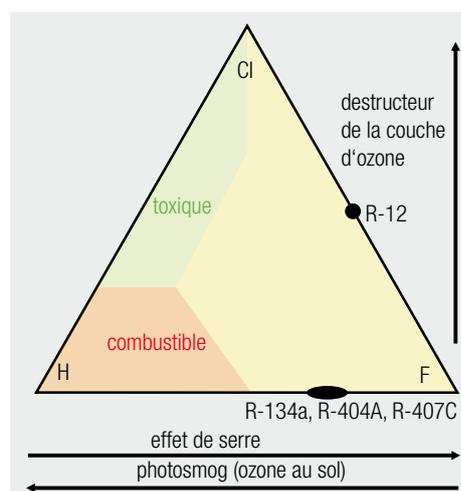


Figure 3.1: Fluides réfrigérants synthétiques (dérivés halogénés du méthane et de l'éthane)

par exemple les R-12 et R-502, sont très nocifs pour la couche d'ozone et générateurs d'effet de serre. Ils sont interdits en Suisse.

- Les **HCFC** (hydrochlorofluorocarbures partiellement halogénés), comme par exemple le R-22, sont nocifs pour la couche d'ozone et générateurs d'effet de serre. Ils sont interdits en Suisse pour les nouvelles installations (www.cheminfo.ch).
- Les **HFC** (hydrocarbures fluorés partiellement halogénés), comme par exemple les R-134a, R-404A, R-407C, R-410A et R-507A, sont générateurs d'effet de serre (www.cheminfo.ch).
- Les **fluides réfrigérants naturels**, comme par exemple le R-717 (ammoniac), R-744 (CO₂), R-290 (propane), R-600a (isobutane) et R-718 (eau), ne sont

pas nocifs pour la couche d'ozone ni générateurs d'effet de serre (www.cheminfo.ch).

3.2 Choix du fluide réfrigérant

Les fluides réfrigérants détruisant la couche d'ozone ne sont plus autorisés dans les pompes à chaleur et installations frigorifiques. A puissance et efficacité comparables, il y a lieu d'employer un fluide réfrigérant à potentiel de réchauffement global (PRG) réduit.

Fluides réfrigérants	PRG _{100a} (CO ₂ =1,0)	Valeur limite pratique (kg/m ³)	Données de sécurité	Température critique (°C)	Glissement de température à 1 bar _a (K)	Température d'ébullition à 1 bar _a (°C)
R-134a	1200	0,25	–	101	0	–26
R-407C	1520	0,31	–	87	7,4	–44
R-404A	3260	0,48	–	73	0,7	–47
R-410A	1720	0,44	–	72	<0,2	–51
R-417A	1950	0,15	–	90	5,6	–43
R-507A	3300	0,52	–	71	0	–47
<i>R-290 (propane)</i>	<i>3</i>	<i>0,008</i>	<i>inflammable</i>	<i>97</i>	<i>0</i>	<i>–42</i>
<i>R-717 (NH₃)</i>	<i>0</i>	<i>0,00035</i>	<i>toxique</i>	<i>133</i>	<i>0</i>	<i>–33</i>
<i>R-723 (NH₃&DME)</i>	<i>8</i>	–	<i>toxique</i>	<i>131</i>	<i>0</i>	<i>–37</i>
<i>R-744 (CO₂)</i>	<i>1</i>	<i>0,07</i>	<i>haute pression</i>	<i>31</i>	<i>0</i>	<i>–57*</i>
<i>R-718 (H₂O)</i>	<i>0</i>	–	–	<i>374</i>	<i>0</i>	<i>100</i>

En italique: Fluides réfrigérants naturels

*Le CO₂ doit être injecté à une pression supérieure à de 5,3 bar (point triple) pour empêcher la formation de glace

«PRG_{100a}» désigne l'effet de serre rapporté à CO₂ = 1, induit sur une période de 100 ans

La «valeur limite pratique» désigne la valeur limite maximale admissible du fluide réfrigérant dans l'air. Elle tient compte des marges de sécurité pour des concentrations irrégulières (stratification).

La «température critique» désigne la température au-delà de laquelle il est impossible de condenser un gaz, même à des pressions élevées.

Le «glissement de température» désigne la différence entre la température d'ébullition et la température de condensation à pression constante.

Tableau 3.1: Tableaux des caractéristiques des fluides réfrigérants

3.3

Effet de serre et indice de réchauffement climatique global (TEWI)

Le TEWI (Total Equivalent Warming Impact) est un procédé permettant d'évaluer le réchauffement global par la détermination de l'incidence directe des émissions de fluides réfrigérants dans l'atmosphère ainsi que de l'incidence indirecte des émissions de dioxyde de carbone dues à la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation frigorifique pendant sa durée de vie. Pour une installation donnée, l'indice TEWI comprend:

- L'incidence directe sur l'effet de serre en raison des pertes de fluides réfrigérants dans certaines conditions;
- L'incidence indirecte sur l'effet de serre en raison de la libération de CO₂ lors de la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

Important pour l'indice TEWI:

- L'utilisation de l'indice TEWI permet de déterminer les mesures les plus efficaces pouvant être prises pour réduire l'influence effective d'une installation frigorifique sur l'effet de serre.
- L'indice TEWI peut être calculé au moyen de la formule mentionnée dans l'encart ci-dessous.
- L'indice TEWI pourrait être fortement réduit si la pompe à chaleur était alimentée par de l'électricité verte produite exclusivement à partir de sources d'énergie renouvelables.
- L'indice TEWI exerce une influence sur les frais d'exploitation de l'installation.

Méthode de calcul pour TEWI

TEWI = Total Equivalent Warming Impact

$$\text{TEWI} = (\text{PRG} \cdot \text{L} \cdot \text{n}) + (\text{PRG} \cdot \text{m} [1 - \alpha_{\text{récupération}}] + (\text{n} \cdot \text{E}_{\text{annual}} \cdot \beta))$$

|← Fuite → | ← Pertes de récupération → | ← Besoins en énergie →|

|← Effet de serre direct → | ← Effet de serre indirect →|

PRG_{100a} = potentiel d'effet de serre en équivalent CO₂ par kg de fluide réfrigérant (kg_{KM})

L = fuite par année en kg_{KM}/a

n = durée de fonctionnement de l'installation en années

m = masse de remplissage de l'installation en kg de fluide réfrigérant

α_{Récupération} = sans dimension

E_{an} = besoins en énergie par année en kWh_{el}/an

β = émissions de CO₂ par kWh_{el} selon la composition de l'électricité [équivalent CO₂/kWh_{el}]

4.

Sources de chaleur

Les pompes à chaleur peuvent utiliser les sources de chaleur suivantes:

- Air extérieur
- Géothermie
- Eaux souterraines et de surface
- Rejets thermiques

En principe, plus le niveau de température de la source de chaleur est bas, moins bonne est l'efficacité (COP) de la pompe à chaleur.

4.1 Air extérieur

L'air extérieur représente une ressource en quantité inépuisable en tant que source de chaleur, et ne requiert aucune autorisation officielle.

Un inconvénient réside toutefois dans le fait que la température de la source de chaleur est opposée à la température du système de chauffage.

Systèmes: On distingue les modèles suivants:

- Installation compacte pour le placement à l'intérieur
- Installation compacte pour le placement à l'extérieur
- Installation split

L'installation compacte destinée à un placement intérieur est en règle générale dédiée à des installations de petite et de moyenne taille (puissance de chauffage: 5 kW à 50 kW). L'installation compacte destinée à un placement en extérieur est privilégiée lorsque aucune place n'est disponible à l'intérieur du bâtiment.

Les installations split sont utilisées dans le cas où l'air extérieur, en raison du débit volumique d'air requis, ne peut être acheminé directement jusqu'au module placé dans le bâtiment. La partie évaporateur est disposée à l'extérieur tandis

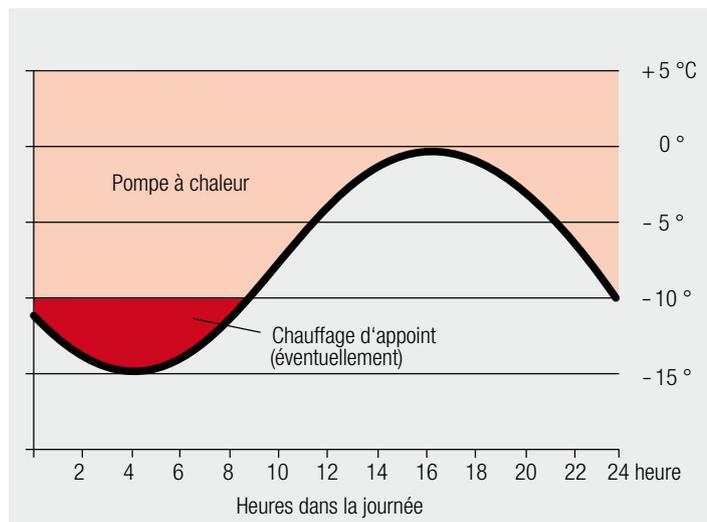


Figure 4.1: Exemple d'un cycle journalier de température extérieure

que le compresseur et le condenseur se trouvent dans le bâtiment.

Indications pour la planification

- L'utilisation d'air extérieur en tant que source de chaleur n'est pas sujette à autorisation.
- Le raccordement électrique doit toutefois être autorisé par le fournisseur d'électricité compétent.
- La température du système de chauffage est limitée, en raison de la température parfois basse de la source.
- En présence de températures extérieures inférieures à environ +5 °C et pour un certain degré d'humidité ambiante, l'évaporateur se couvre de givre. Un système de dégivrage automatique est ainsi nécessaire.
- Le refroidissement de l'air en dessous du point de rosée produit de l'eau de condensation. Celle-ci doit être collectée et évacuée dans une conduite protégée contre le gel.
- Il convient de veiller à ce que l'air refroidi de la pompe à chaleur ne soit pas happé par le flux d'air extérieur (court-circuit).
- L'utilisation d'échangeurs de chaleur ou le prélèvement de l'air au niveau de points «chauds» (garage, installation d'évacuation de l'air du bâtiment) permet d'accroître l'efficacité énergétique de la pompe à chaleur.
- La pompe à chaleur doit être protégée des dommages susceptibles d'être causés par des personnes, ainsi que de la neige, des feuilles mortes, des particules de poussière et des petits animaux.
- Une installation fixe d'appareils extérieurs requiert un permis de construire.
- Lors de la planification d'une installation à éléments séparés, les règles de

base en matière de technique frigoriste doivent être respectées avec un soin tout particulier.

- Il convient de porter une attention particulière aux émissions sonores (Chapitre 7).



Figure 4.2: Installation compacte pour le placement intérieur. (Photo: BKW FMB Energie SA)



Figure 4.3: Installation compacte pour le placement extérieur. (Photo: BKW FMB Energie SA)



Figure 4.4: Sonde géothermique. (Photo: BKW FMB Energie SA)

4.2 Géothermie

La terre est un générateur de chaleur idéal. Dès une profondeur d'environ 10 m sous la surface du sol, la terre présente une température approximativement constante tout au long de l'année. Plus la profondeur augmente, plus la température en sous-sol croît, à raison d'environ 3 K tous les 100 m. Cette constance sur l'année constitue une condition idéale pour l'utilisation de la chaleur terrestre à des fins de chauffage. Les sondes géothermiques sont généralement disposées dans un trou de forage réalisé à des profondeurs comprises entre 50 m et 350 m.

Sondes géothermiques

Pour récupérer la chaleur du sol, on utilise aujourd'hui, en règle générale, des sondes géothermiques ou des champs de sondes géothermiques remplis d'eau ou d'un mélange eau/glycol.

Systèmes: Il s'agit en majeure partie de tubes en matière synthétique PE, pouvant être utilisés dans différents agencements. L'agencement avec deux tuyaux doubles s'est notamment imposé. Au centre, on place un tuyau supplémentaire par lequel le trou de forage est rempli par le bas d'un mélange bentonite/ciment/eau, et qui garantit que les tuyaux calorifères d'eau ne glissent pas de la paroi du forage.

Les installations de sondes géothermiques doivent être placées en fonction des aspects énergétiques suivants:

- sous-sol
- nombre de sondes
- longueur des sondes
- distance entre les sondes
- diamètre des tubes
- perte de pression du système

Indications pour la planification

- Les installations de sonde géothermique sont sujettes à autorisation (compétence cantonale). Les valeurs suivantes ne doivent pas être dépassées: quantité d'énergie annuelle de 100 kWh par mètre ainsi qu'environ 2000 heures de service pleines par an pour une charge de la sonde géothermique de 50 W/m.
- Si l'installation de sonde géothermique est également utilisée en tant que «source de froid» à des fins de refroidissement (free cooling), le sol peut être partiellement «régénéré» par l'apport de chaleur. Les répercussions sur le dimensionnement de la sonde géothermique sont à clarifier.
- Les installations de sonde géothermique ne doivent pas être utilisées pour la déshumidification des constructions, car les indications mentionnées ci-dessus ne sont généralement plus respectées.
- L'installation de sonde géothermique doit être réalisée exclusivement par une société de forage agréée.
- L'accès de l'appareil de forage au lieu de forage doit être garanti. Il convient en outre de respecter les exigences particulières du site de forage.
- Les conduites d'arrivée menant à la sonde géothermique depuis le distributeur doivent être posées à une profondeur suffisante (hors gel). Si cela s'avère impossible, elles doivent être pourvues d'une isolation thermique.

Tableau 4.1: Longueur et contenu de sondes ainsi que diamètre de forage. Hypothèse: double tube en U.

* Il faut utiliser des diamètres plus grands (4 3/4" bis 7 5/8") pour les forages avec injection d'eau dans un sous-sol menacé d'écroulement (sables siliceux etc.) selon le diamètre des sondes géothermiques et les conditions pédologiques.

Diamètre du tube	Contenance par mètre	Diamètre du trou de forage*	Longueur maximale
32 mm	2,12 litres	112 à 115 mm	env. 150 m
40 mm	3,34 litres	127 à 135 mm	env. 300 m
50 mm	5,18 litres	152 mm	> à 300 m

- Dans le cas d'une conception optimale, un fonctionnement avec uniquement de l'eau en tant que fluide frigorigène est possible. La température d'évaporation doit être choisie suffisamment élevée pour empêcher toute formation de glace.
- La distance entre les sondes géothermiques individuelles dépend du projet.



Figure 4.6: Pieu de forage
(Photo: enercret Röthis)



Figure 4.7: Pieu enfoncé
(Photo: enercret Röthis)

- Les installations de grande taille (champs de sondes géothermiques) doivent être planifiées par des spécialistes qualifiés. Il est recommandé de réaliser un calcul de simulation.

Sonde géothermique avec technique au dioxyde de carbone

En variante à la sonde géothermique avec remplissage eau ou eau/glycol, la sonde peut également fonctionner avec du CO₂. La sonde au CO₂ fonctionne selon le principe du caloduc (heat pipe). Du CO₂ (dioxyde de carbone) non toxique circule dans la sonde géothermique. Le CO₂ est injecté, à l'état liquide et sous pression, dans la sonde géothermique. Il descend et se réchauffe à mesure que la température augmente dans le sol. Lors de ce processus, le liquide s'évapore puis se condense à nouveau au niveau du point le plus froid, c'est-à-dire dans l'évaporateur de la pompe à chaleur, et transmet ainsi la chaleur du sol à la pompe à chaleur. Le CO₂ circule, à l'inverse du fluide frigorigène d'une sonde géothermique traditionnelle, sans énergie auxiliaire, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie. Toutefois, une telle sonde ne peut pas être régénérée en été par un apport de chaleur depuis la pompe à chaleur. Cette sonde ne permet ainsi aucun refroidissement du bâtiment.

Registre géothermique

À la place des sondes géothermiques, on utilise également des registres géothermiques. Ceux-ci se composent de serpents enfouis horizontalement dans le sol, à une profondeur comprise entre 1,2 et 1,5 mètre sous la surface du terrain. Les registres géothermiques prélèvent au sol principalement la chaleur apportée par le rayonnement solaire et la pluie. En rè-

gle générale, on utilise un mélange anti-gel en tant que fluide caloporteur.

Systèmes: Les registres géothermiques sont en règle générale enfouis dans le sol sous forme de tuyaux en matière synthétique ou de tuyaux en cuivre enrobés de matière synthétique, et sont rassemblés dans le bâtiment, ou dans une gaine à l'extérieur du bâtiment, sur un distributeur ou collecteur.

Indications pour la planification

- Les registres géothermiques peuvent être sujets à autorisation (compétence cantonale).
- L'énergie maximale prélevée dans le sol (puissance frigorifique) s'élève, pour chaque m² de surface de registre, à environ 25 W à 30 W ou à environ 60 kWh pendant la période de chauffage.
- Lors du recouvrement du registre géothermique, le système doit être sous pression, afin de détecter les éventuels dommages (les pierres, gravats, etc. ne sont pas appropriés au recouvrement).

Figure 4.8: Corbeilles géothermiques
(Photo: Calmotherm))



Pieux énergétiques

Les pieux énergétiques sont en règle générale utilisés dans les lieux dotés d'un terrain instable, en tant que pieux de fondation. Le pieu énergétique est ainsi utilisé en premier lieu en tant qu'élément statique. L'agencement et l'étendue sont déterminés selon les exigences relatives au bâtiment ou au terrain. Le gain énergétique dépend ainsi des conditions géologiques et de mesures partiellement statiques (longueur et agencement). En général, on utilise un mélange antigel en tant que fluide caloporteur.

Systèmes: On différencie deux types de conceptions – le pieu foré à la tarière et le pieu enfoncé.

Les pieux forés à la tarière se composent de cages d'armature auxquelles sont fixés des tuyaux. Ils sont plongés dans un trou de forage, qui est ensuite rempli de béton.

Les pieux enfoncés sont des pieux en béton préfabriqués, dans lesquels les tuyaux sont posés et coulés en usine. Lors de l'enfoncement, il convient de prendre garde à ne pas endommager les raccords des conduites à l'extrémité des pieux.

Indications pour la planification

- Les pieux énergétiques sont sujets à autorisation (compétence cantonale).
- La planification doit être réalisée par des spécialistes qualifiés.
- L'accès de l'outil de travail à l'emplacement de forage ou d'enfoncement doit être garanti. Il est en outre impératif de respecter les exigences relatives au lieu de travail.

- Les conduites menant du pieu énergétique au distributeur doivent être posées à une profondeur suffisante et être pourvues d'une isolation thermique.
- Selon le sol et l'agencement, un fonctionnement avec uniquement de l'eau en tant que fluide caloporteur est possible.

Corbeilles géothermiques

Les corbeilles géothermiques sont des tuyaux en matière synthétique enroulés en spirale, installés à une profondeur comprise entre 1,5 et 3,5 m. Tout comme les registres géothermiques, elles sont influencées par les conditions météorologiques à la surface du sol.

Puits géothermiques

Des tuyaux en matière synthétique sont posés horizontalement dans des puits profonds de 1 m à 1,5 m. Ceux-ci subissent également l'influence des conditions météorologiques à la surface du sol.

Parois moulées

Les parois moulées sont creusées, selon le sol ou la profondeur, à l'aide d'un grappin ou d'une fraise. Dans le segment

moulé dans le sol, on introduit la cage d'armature sur laquelle sont fixés les tuyaux en matière synthétique, puis on remplit de béton.

Raccordement du système d'exploitation de l'énergie géothermique

Outre la conception correcte de la source de chaleur, le système hydraulique du circuit primaire mérite également qu'on lui porte une attention particulière.

Fluide caloporteur

En général, les systèmes d'exploitation de l'énergie géothermique fonctionnent avec un mélange antigél. Toutefois, les systèmes d'exploitation de l'énergie géothermique peuvent également, pour une conception appropriée (p. ex. par calcul de simulation), fonctionner avec de l'eau sans additifs. Dans ce cas, la température d'évaporation doit être suffisamment élevée pour empêcher toute formation de glace.

La concentration du mélange antigél doit correspondre aux prescriptions du fabricant (protection anticorrosion). Les propriétés physiques du mélange antigél varient selon la température et la capacité thermique.

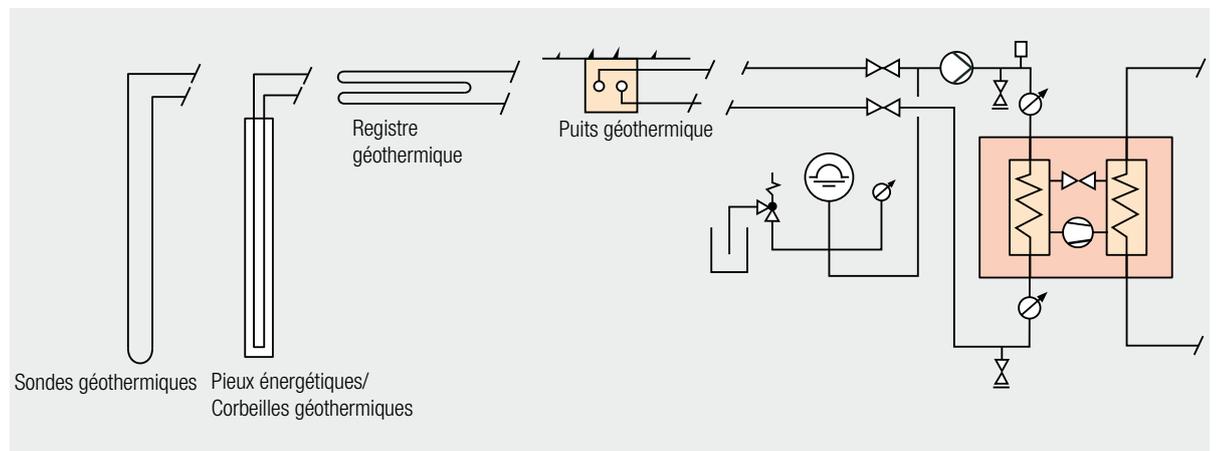


Figure 4.9: Intégration à un système d'exploitation de l'énergie géothermique

Circulateurs

Le circulateur doit toujours être conçu et calculé de manière spécifique à l'installation. Selon la longueur et l'agencement de la sonde géothermique, la perte de pression peut être considérable. Un circulateur surdimensionné ou sous-dimensionné peut faire chuter dramatiquement le rendement de l'ensemble de l'installation. De manière générale, on vise un rendement maximal du circulateur. Dans le cas des pompes à chaleur à régulation de puissance, la puissance du circulateur dans le circuit de la sonde doit également être adaptée au besoin. La formation d'eau par condensation doit également être prise en compte.

Dispositifs de sécurité

- Le dispositif de surveillance de la pression désactive l'installation de pompe à chaleur en cas de chute de pression dans le circuit primaire.
- Le vase d'expansion compense les variations de pression dans le système, résultant d'une variation de température et de modifications au niveau du matériau (p. ex. des fissures sur les tuyaux en matière synthétique).
- Pour protéger l'installation contre les surpressions, il convient d'intégrer une soupape de sécurité. Le trop-plein doit être guidé vers un vase de réception.

Systèmes de tuyaux

- Il convient d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion tels que la matière synthétique, l'acier chromé ou l'acier traité anticorrosion. Aucun tuyau ou raccord galvanisé ne doit être utilisé.
- A l'intérieur du bâtiment, il est impératif d'isoler le réseau de conduites,

y compris les armatures, de manière étanche à la vapeur, afin d'éviter toute condensation.

Equilibrage hydraulique

Les circuits de sonde géothermique individuels doivent être équilibrés hydrauliquement les uns par rapport aux autres. Des armatures de régulation correspondantes doivent être montées au niveau du distributeur de sonde géothermique.

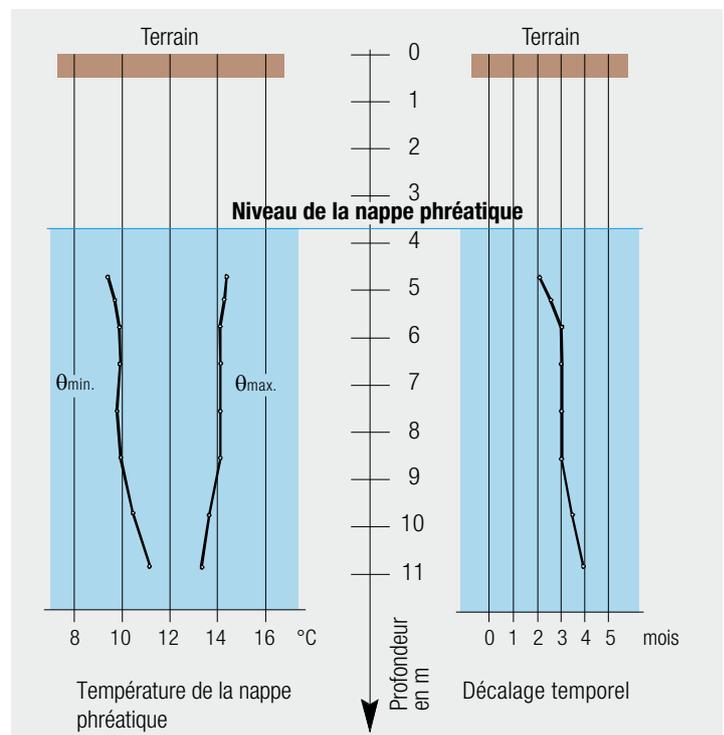
4.3

Eaux souterraines

Réserves d'eau souterraine

L'eau qui, en sous-sol, remplit la roche poreuse, les fissures ou les failles, est appelée eau souterraine. Elle s'écoule, sous l'effet de la pesanteur, principalement le long des zones perméables dans la roche meuble et la roche solide (couches riches en graviers et en sable, grès, roche fissurée ou karstique). L'eau souterraine

Figure 4.10: Températures de la nappe phréatique



proche de la surface est la plupart du est exploitée à partir de profondeurs comprises entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres, principalement à partir de gisements de roche meuble riche en gravier.

La température annuelle moyenne de l'eau souterraine proche de la surface est en règle générale comprise entre 9 °C et 11 °C, et est ainsi supérieure à la température moyenne de l'air extérieur. La température peut être influencée par des infiltrations d'eau de surface ou par la température de l'air. Si l'influence des eaux de surface est relativement faible et que la profondeur d'exploitation s'élève à plusieurs mètres sous la surface du terrain, les variations de la température en fonction des saisons sont toutefois très faibles. De même, le décalage entre les valeurs maximale et minimale augmente avec la profondeur. La variation de température maximale est d'environ 5 K (Figure 4.10).

En raison du niveau de température relativement élevé et constant, l'eau souterraine représente une source de chaleur idéale et fiable pour les pompes à chaleur.

Qualité de l'eau souterraine

La qualité de l'eau souterraine peut être influencée de manière décisive par l'infiltration des eaux de surface (Figure 4.11). Outre l'influence thermique, l'influence sur la qualité de l'eau souterraine doit également être prise en compte. L'eau souterraine n'est dans la plupart des cas pas corrosive. Toutefois, l'apport de matières organiques ou d'oxygène par l'infiltration des eaux de surface peut produire des réactions non souhaitées. C'est pourquoi il est recommandé d'effectuer une analyse simple de la qualité de l'eau

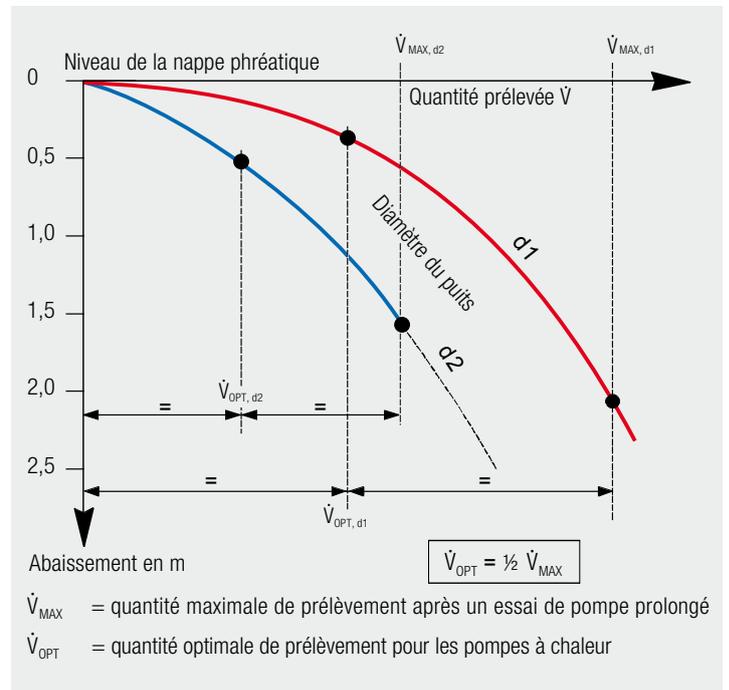
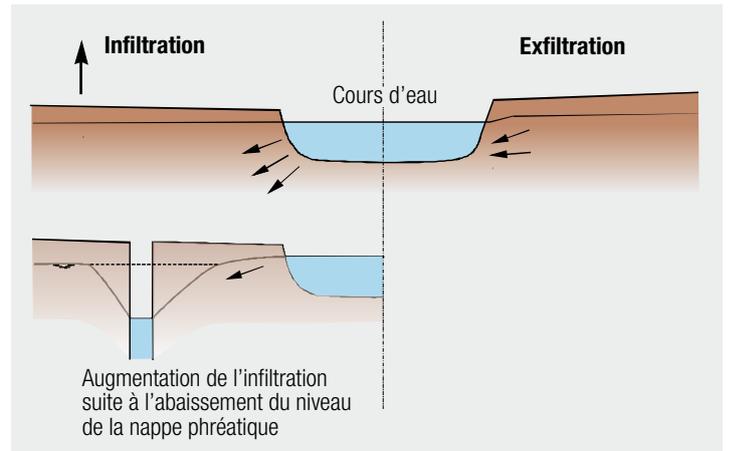
souterraine. Il y a lieu de respecter les valeurs limites suivantes:

- Valeur pH: ≥ 7
- Fer (dissous): $\leq 0,15$ mg/l
- Manganèse (dissous): $\leq 0,1$ mg/l

Les impuretés dues au sable, susceptibles de causer des dommages mécaniques dans l'installation, doivent être totalement absentes dans une installation réalisée dans les règles de l'art, qu'elles proviennent des eaux de surface ou résultent d'une extraction dans des puits filtrants. Pour garantir cela, le puits de

Figure 4.11: Infiltration des eaux de surface

Figure 4.12: Dimensionnement d'un captage d'eau souterraine



prélèvement ainsi que le puits de restitution doivent être planifiés et réalisés sous le contrôle d'un spécialiste qualifié.

Prélèvement et restitution

Le dimensionnement du puits de prélèvement et de restitution (Figure 4.15) dépend avant tout des propriétés de la roche contenant l'eau ainsi que du débit requis par la pompe à chaleur. La quantité de prélèvement optimale à partir d'un puits se situe dans la zone de la moitié de la quantité de prélèvement maximale (Figure 4.12). Le débit requis par kW de besoin calorifique est en règle générale compris entre 150 l/h et 200 l/h. Plus la quantité de prélèvement augmente, plus l'on doit utiliser, en général, des diamètres de forage importants. Le dimensionnement dépend toutefois fortement des conditions locales et doit être réalisé par un spécialiste.

La restitution s'effectue fréquemment également via un puits d'infiltration peu profond. A cet effet, la capacité d'infiltration du sol doit être déterminée. Dans certains cas, la restitution peut s'effectuer dans une eau de surface proche.

Planification et mise en œuvre

Les points suivants doivent être respectés lors de la planification et de la mise en œuvre:

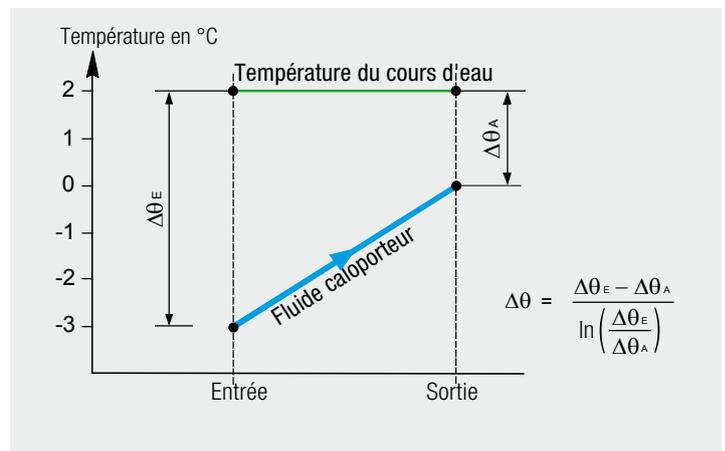
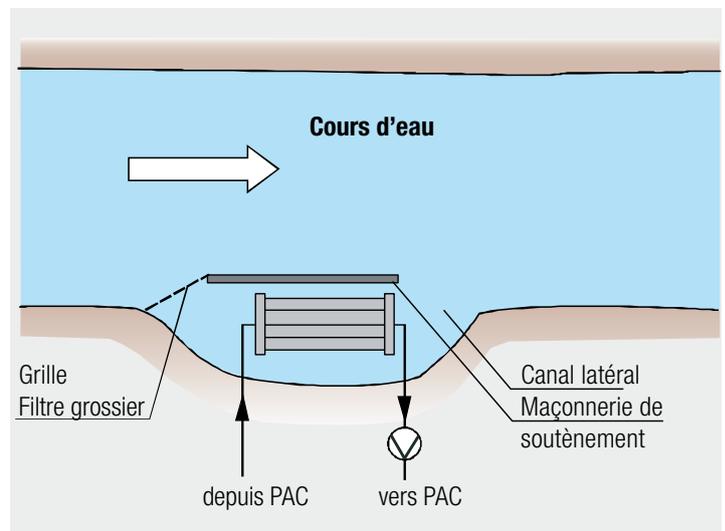
- La planification et la mise en œuvre doivent être effectuées avec l'aval d'un géologue ou d'un hydrogéologue conseil.
- En cas de captages à proximité des eaux de surface, il convient de prendre en compte la possibilité d'infiltration de celles-ci.
- Lors de la localisation des points de prélèvement et de restitution, il convient de veiller à l'écoulement de

l'eau souterraine (aucune restitution dans la zone d'afflux du prélèvement).

- Une simple analyse de l'eau est recommandée.
- La puissance de la pompe de refoulement doit être adaptée au niveau d'eau souterraine le plus faible auquel on puisse s'attendre.
- Un contrôle de la température et de l'écoulement permet de pallier le refroidissement de l'eau exploitée en dessous du point de congélation, ainsi qu'une surexploitation du captage.
- Une autorisation officielle est nécessaire à l'exploitation de l'eau souterraine. L'autorité de délivrance des autorisations diffère selon les cantons.

Figure 4.13: Registre dans les eaux courantes

Figure 4.14: Températures du cours d'eau et du fluide réfrigérant



4.4 Eaux de surface

Les variations de température relativement importantes des eaux de surface (eaux de rivières, de lacs ou de ruisseaux) ne permettent généralement pas un fonctionnement monovalent avec exploitation directe. C'est pourquoi on réalise la plupart du temps une exploitation indirecte: la source de chaleur transmet sa chaleur à un échangeur de chaleur, relié à la pompe à chaleur par un circuit intermédiaire. Le circuit intermédiaire contient un mélange antigel afin que la température d'évaporation puisse descendre en dessous de 0°C .

Le prélèvement de chaleur à partir des eaux de surface est en principe possible de deux manières:

- **Registre dans les eaux courantes** (Figure 4.13): une très grande quantité d'eau s'écoule à travers le registre, le refroidissement est faible en conséquence. (Figure 4.14)
- **Solution du puits de filtration** (Figure 4.16): l'eau est collectée directement dans un puits de filtration à côté des eaux de surface, et de là, est pompée vers un échangeur de chaleur.

Pour la solution du registre, il est recommandé de tabler sur une différence de température logarithmique moyenne de 5 K à 6 K . Pour dimensionner la surface de l'échangeur de chaleur, on peut utiliser des coefficients U de 200 à $300\text{ W/m}^2\text{ K}$ (vitesse d'écoulement $> 0,5\text{ m/s}$). Il est recommandé d'ajouter une marge de sécurité d'environ 25% pour un éventuel encrassement du registre. La source de chaleur à écoulement rapide (eaux de ruisseaux et de rivières) empêche la formation de glace. La distance entre les tuyaux doit être au minimum égale à 4



Figure 4.15: Puits de prélèvement et de restitution (Photo: BKW FMB Energie SA)

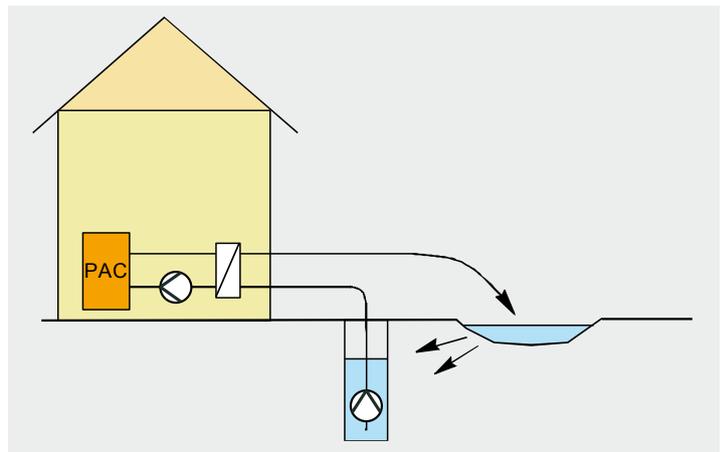


Figure 4.16: Puits d'infiltration

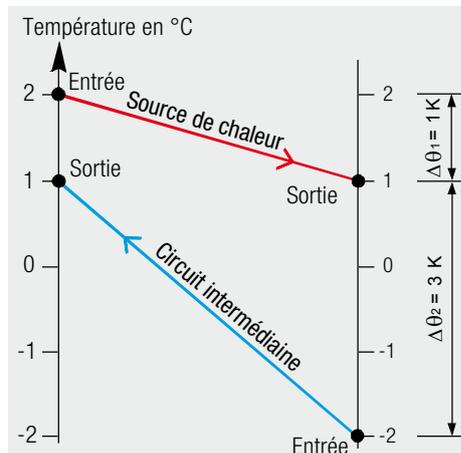


Figure 4.17: Températures des sources de chaleur et du circuit intermédiaire

cm. En outre, le registre doit être protégé contre les éboulis par des mesures constructives et être facile à nettoyer. Dans des eaux stagnantes, cette solution n'est applicable qu'à certaines conditions.

L'avantage de la solution du puits de filtration réside dans le prélèvement d'eau quasiment exempt d'impuretés. Un fonctionnement monovalent est souvent possible.

Pour résumer, on peut dire que:

- Un circuit intermédiaire fournit des températures d'évaporation plus basses et ainsi des rendements moins bons.
- L'apport en eau est souvent variable (p. ex. ruisseau).
- Pour chaque kW de besoin calorifique, le besoin en eau est en règle générale compris entre environ 300 l/h et 400 l/h.
- La réalisation est plutôt difficile (en particulier la solution du registre).
- L'exploitation des eaux de surface est assujettie à une autorisation officielle. Le procédé d'octroi de l'autorisation ainsi que l'entretien peuvent s'avérer très complexes, notamment dans le cas de la solution du registre.
- Une analyse de l'eau est vivement recommandée.
- Une autorisation officielle est requise (n'est octroyée que s'il n'y a pas d'exploitation d'eau potable).
- Il convient de prendre garde aux encrassements et obstructions dus aux coquillages.

4.5

Rejets thermiques

Les rejets thermiques doivent être utilisés directement chaque fois que possible. Si une utilisation directe s'avère impossible en raison des températures d'exploitation requises, les rejets thermiques présents peuvent être amenés au niveau de température requis au moyen d'une pompe à chaleur.

Eaux usées

Les eaux usées sont présentes sous différentes formes, par exemple sous forme non épurée dans les canalisations, sous forme préalablement épurée dans les entreprises industrielles ayant un besoin élevé en eau propre ou sous forme épurée à la sortie des stations d'épuration. Les températures d'eau varient entre 10°C et 25°C dans les canalisations et dans les stations d'épuration, ou peuvent atteindre plus de 60°C dans les entreprises industrielles.

Le refroidissement des eaux usées ne représente aucun problème dans des installations correctement planifiées et lorsque l'on respecte les prescriptions de l'exploitant de la station d'épuration, et ne nuit en rien à l'épuration des eaux usées ni aux eaux courantes.

Systèmes

Échangeur de chaleur de canalisation: Le prélèvement d'énergie s'effectue par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur intégré dans le fond de la canalisation d'eaux usées. Dans le cas des canalisations d'eaux usées neuves, on utilise également, pour le prélèvement de la chaleur, des tuyaux directement intégrés dans le béton de la canalisation d'eaux usées.

Échangeur de chaleur dans la dérivation: L'intégration s'effectue parallèlement à la canalisation d'eaux usées. Cette solution présente l'avantage de ne causer quasiment aucune perturbation de la canalisation d'eaux usées pendant la période de construction.

Prélèvement d'énergie sans échangeur de chaleur de canalisation: Ce système est avantageux dans le cas des installations de grande taille dans lesquelles l'utilisation d'échangeurs de chaleur de canalisation se heurte à des limites techniques. Dans ce cas, on guide les eaux usées, avec ou sans circuit intermédiaire, via l'évaporateur, jusqu'à la pompe à chaleur. Afin d'éviter tout encrassement de l'évaporateur ou de l'échangeur de chaleur, une épuration préalable des eaux usées est nécessaire, ou il convient de concevoir les appareils en fonction de la qualité des eaux usées.

Pompes à chaleur pour eaux usées: Le prélèvement d'énergie s'effectue directement dans ou à côté du bâtiment, avant que les eaux usées ne soient acheminées dans les canalisations. Plusieurs systèmes spécifiques aux fabricants sont disponibles.

Indications pour la planification

- Pour des raisons techniques et économiques, ces installations nécessitent une quantité d'eau minimale.
- En cas d'utilisation d'échangeurs de chaleur de canalisation, on peut tabler sur une puissance de prélèvement spécifique d'environ 2 kW/m².
- Des températures d'eaux usées élevées permettent un refroidissement plus important et ainsi un prélèvement d'énergie accru. Les conditions idéales sont données pour des températures d'eaux usées qui, dans le pire des cas, sont supérieures à 10 °C.

- Une condition importante est une production d'eau continue. La nuit et le week-end également, les quantités d'eau minimales nécessaires au fonctionnement doivent être respectées.
- L'accès doit être garanti pour le montage ainsi que pour la maintenance ultérieure.
- La distance entre la source de chaleur et l'emplacement de la pompe à chaleur doit être aussi faible que possible, car dans le cas contraire, une énergie de transport considérable est nécessaire pour le transport de l'énergie collectée, ce qui entraîne des répercussions négatives sur le COPAn.
- De telles installations doivent être planifiées par des spécialistes expérimentés.

Installations frigorifiques

Systèmes: Toutes les installations frigorifiques produisent des rejets thermiques. Dans le cas des grandes installations modernes, les rejets thermiques sont la plupart du temps évacués dans l'environnement via un système de refroidissement. Le système de refroidissement peut ainsi être exploité de manière optimale en tant que source de chaleur avec pour effet secondaire qu'une température de refroidissement plus basse entraîne un besoin en énergie moins important.

Lorsque les installations frigorifiques sont désactivées, le refroidisseur, s'il possède une conception appropriée, peut prélever de l'énergie à partir de l'air ambiant. La pompe à chaleur fonctionne alors en tant que pompe air-eau indirecte.

Indications pour la planification

- La conception et la définition des limites d'utilisation ainsi que de l'interface hydraulique et de régulation

doivent impérativement être clarifiées avec le fabricant ou le fournisseur de l'installation frigorifique.

- Le besoin calorifique doit coïncider avec l'évolution simultanée de la charge des installations frigorifiques.
- L'isolation thermique (condensation) du système de refroidissement doit également être prise en considération.

Installations de ventilation et de climatisation

Systèmes: L'utilisation de pompes à chaleur est également intéressante avec les installations de ventilation et de climatisation. La pompe à chaleur représente un composant idéal pour la récupération de la chaleur. Il est ainsi possible de récupérer à la fois la chaleur sensible et la chaleur latente à partir d'un flux d'air évacué et de ramener cette énergie calorifique dans le circuit.

Les solutions standard sont par exemple utilisées dans les appareils de ventilation des piscines couvertes et dans les bâtiments à ventilation contrôlée.

Dans les piscines couvertes, c'est avant tout la déshumidification de l'air ambiant qui importe. Dans ces appareils, le flux d'air est tout d'abord guidé via l'évaporateur (déshumidification) puis via le condenseur (réchauffement du flux d'air). La chaleur en excès est souvent utilisée pour chauffer l'eau du bassin.

Une autre application concerne les installations de ventilation décentralisées. Dans les installations de petite taille avec une distance entre les installations d'air rejeté et les installations d'air entrant inférieure à 25 m, l'évaporateur est directement intégré dans le monobloc d'air rejeté ou le condenseur dans le monobloc d'air entrant. Dans les grandes installations ou pour de grandes distances, un circuit intermédiaire est recommandé.

Dans le cas d'un excès de chaleur, les installations peuvent être utilisées pour chauffer le bâtiment ou, hors de la période de chauffage, pour la production d'eau chaude sanitaire.

Indications pour la planification

- Les échangeurs de chaleur disposés dans les installations de ventilation doivent être facilement accessibles pour un nettoyage régulier. Il convient en outre de prévoir une isolation thermique appropriée (eau de condensation).
- Les deux flux d'énergie (source et puits) doivent être disponibles de la façon la plus synchronisée possible, sous peine de requérir un stockage d'énergie pouvant engendrer très vite des coûts élevés.

4.6

Refroidissement de bâtiments

Dans de nombreux cas, le bâtiment peut être refroidi directement par l'exploitation de la chaleur terrestre, des eaux souterraines ou des eaux de surface. Dans ce cas, on parle de refroidissement naturel (free cooling).

Le prélèvement de chaleur s'effectue sans compresseur

Si cela s'avère insuffisant, une machine frigorifique ou une pompe à chaleur commutable peuvent être intégrées dans le système. Les rejets thermiques de ces installations peuvent être utilisés pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire. La chaleur non utilisable est évacuée vers le sol, l'air, les eaux souterraines, les eaux de surface ou les eaux usées.

Le prélèvement de chaleur s'effectue avec compresseur

Systèmes. On distingue en principe les systèmes suivants:

- Installations avec apport de froid (machine frigorifique)
- Installations avec apport de chaleur (pompe à chaleur)

En d'autres termes, le mode de fonctionnement décide de s'il s'agit d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur ou d'une installation combinée.

L'énergie peut en principe être amenée au consommateur ou prélevée depuis celui-ci via le même système de distribution. En mode de refroidissement, le système doit être protégé contre des températures de fonctionnement trop basses (formation d'eau de condensation) ou doit être correctement isolé en fonction des conditions d'utilisation et protégé contre la corrosion.

Dans leur configuration traditionnelle, les systèmes de chauffage fonctionnent, en mode de refroidissement, avec une température de fluide d'au moins 17°C à 20°C, de sorte qu'aucune eau de condensation ne peut en général se former.

Exemples: Si, pour la production d'eau chaude, on prélève l'énergie à partir du bâtiment et non via une source de chaleur, il s'agit d'une **pompe à chaleur utilisant un évaporateur**.

Si l'on utilise un système de chauffage basse température pour le refroidissement d'un bâtiment, et que l'énergie est envoyée directement à l'installation de sonde géothermique, par exemple au moyen d'échangeurs de chaleur, il s'agit d'un **refroidissement naturel**.

Le refroidissement de l'air entrant s'effectue au moyen d'un compresseur, à l'aide d'une machine frigorifique ou d'une

pompe à chaleur pouvant être commutée en mode de refroidissement. Les rejets thermiques sont au moins partiellement utilisés dans le bâtiment, la chaleur résiduelle étant évacuée via l'air extérieur. Il s'agit alors d'une **machine frigorifique avec utilisation des rejets thermiques**.

Indications pour la planification

- Respecter l'assujettissement à autorisation (compétence cantonale).
- Le besoin en chaleur et en froid du bâtiment, avec les températures de fluide associées, doit être défini dans une phase préalable. Le système de distribution doit être conçu en conséquence, en fonction des différentes exigences.
- Dans le cas d'installations de sonde géothermique, il convient de prendre en compte l'utilisation primaire lors du choix de la longueur de sonde.
- En cas d'exploitation de l'eau souterraine, des eaux de surface et des eaux usées, il convient de définir les températures de restitution maximales conjointement avec les autorités compétentes.
- Il est impératif de veiller tout spécialement au bon choix des interfaces de régulation entre la production, la distribution et le consommateur. Une séparation claire et correcte facilite la planification et la réalisation ainsi que le fonctionnement, notamment dans des installations complexes.

5.

Distribution de chaleur

Un système de distribution de chaleur est un système qui transporte et cède à la pièce la chaleur générée par le système de production de chaleur et transportée par le système de distribution de chaleur.

Les températures du système de distribution de chaleur dépendent de la puissance calorifique effective (puissance thermique à installer) du bâtiment et par conséquent de ses conditions énergétiques (emplacement choisi, lieu, géométrie, construction, utilisation).

Puisque les pompes à chaleur utilisent plus efficacement l'énergie du compresseur lorsque les différences de température sont faibles entre l'évaporateur et le condenseur, la température du condenseur au sein du système de chauffage doit être la plus basse possible, tout comme la température de départ. La température de départ glissante de l'exploitation constante doit être préférée en cas de charge partielle. Les pompes à chaleur fonctionnant à des températures élevées gaspillent inutilement de l'énergie électrique précieuse et alourdissent le budget de fonctionnement de l'exploitant.

Les pompes à chaleur sont soumises à des lois régissant leur construction et leur fonctionnement thermodynamique. Des limites ont également été fixées au niveau de leur dimensionnement. Contrairement à une chaudière dont la puissance du brûleur et par conséquent celle de la chaudière peuvent être augmentées dans un cadre limité, ceci est impossible avec

les pompes à chaleur. Elles ne sont donc pas adaptées pour assécher les bâtiments à une température de départ élevée ou pour compenser au niveau énergétique un abaissement nocturne.

5.1 Chauffage à eau chaude

Systèmes: Les systèmes de distribution de chaleur pour le chauffage à eau chaude concernent surtout le chauffage au sol ou par corps de chauffe ou une combinaison de ces deux systèmes. Ces dernières années, l'installation de systèmes de composants thermoactifs (TABS) est devenue très courante, surtout dans les bâtiments basse énergie.

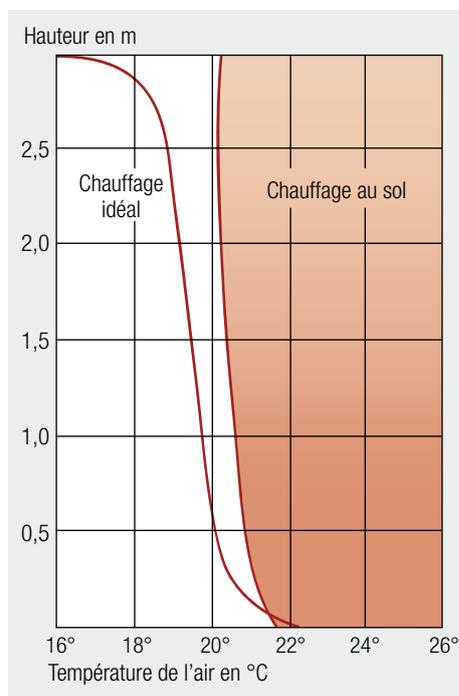


Figure 5.1: Courbe de température avec chauffage au sol

Chauffage de sol

Avantages

- + Un dégagement de chaleur important à des températures de départ basses dû à la compensation par la taille importante de la surface au sol
- + Bonne répartition de la chaleur sur toute la hauteur de la pièce
- + La chape peut servir d'accumulateur d'énergie.

Inconvénients

- Inertie due à l'installation dans la chape
- Accès au corps de chauffe impossible après la construction.

La réduction des besoins en énergie exigée par les lois sur l'énergie en vigueur depuis les années 80 a un impact direct sur la puissance thermique à installer et la conception de systèmes de chauffage domestique. Les températures de départ peuvent donc être en partie considérablement réduites.

Les faibles températures de départ de la pompe à chaleur ont permis d'obtenir une utilisation plus efficace de l'énergie. L'idée très répandue selon laquelle le chauffage au sol est inévitablement lié à un sol chaud ne correspond pas à la réalité. C'est au bureau technique et aux installateurs que revient la mission d'informer les architectes et maîtres d'ouvrage sur l'importance des faibles températures de départ lors du choix des matériaux pour le revêtement de sol. En effet, les chauffages au sol font régulièrement l'objet de réclamations en raison de surfaces froides (Figure 5.3).

La figure 5.2 montre très clairement le dégagement de chaleur par le pied selon les différents matériaux de sol.

Effet d'autorégulation: L'effet d'autorégulation d'un système de dégagement de chaleur est la diminution automatique de la puissance de chauffe lorsqu'une source de chaleur extérieure pénètre dans la pièce. La figure 5.4 décrit l'importance de l'effet d'autorégulation dans le domaine du chauffage.

Il en résulte que la surtempérature ne doit pas être choisie à un niveau trop

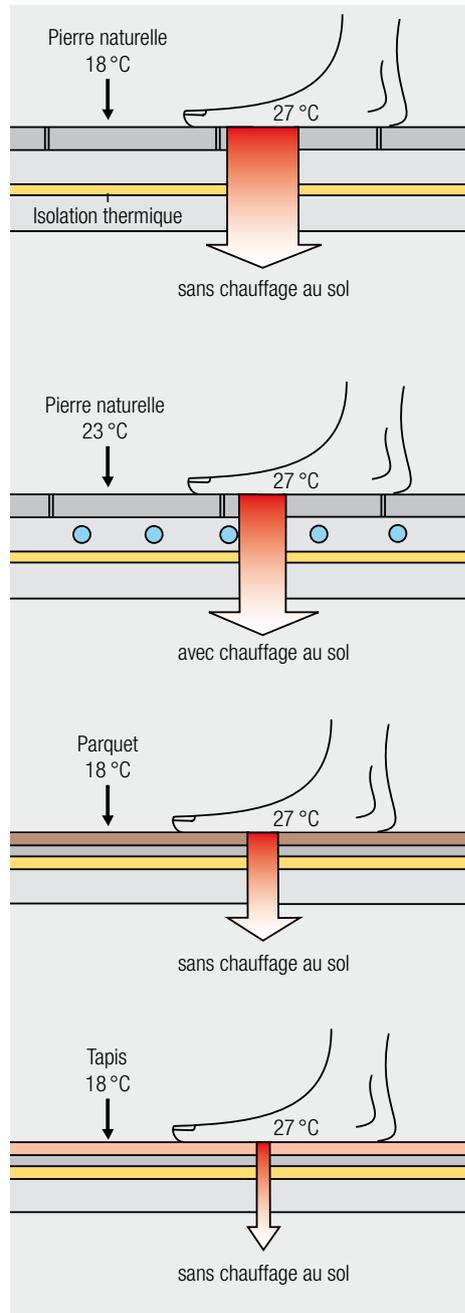


Figure 5.2: Dégagement de chaleur par le pied selon les différents matériaux de sol

élevé si l'on souhaite profiter de l'effet d'autorégulation et éviter un dépassement de la température de l'air ambiant.

Systèmes de composants thermoactifs

Les systèmes de composants thermoactifs sont des éléments de construction qui font partie des parois ou cloisons de délimitation d'une pièce et qui sont alimentés en fluide caloporteur ou réfrigérant par l'intermédiaire d'un système de conduites intégré et qui permettent ainsi de chauffer ou de refroidir les locaux. Ils s'appliquent à divers types de construction allant des plafonds chauffants ou réfrigérants aux chauffages au sol, en passant par les dalles d'étages avec conduites intégrées. Ces systèmes à forte inertie intégrés à l'intérieur sont employés à dessein afin de découpler dans le temps l'offre énergétique et les besoins énergétiques domestiques sur le plan de l'utilisation finale de l'énergie, par exemple, refroidissement actif des éléments de construction la nuit et refroidissement passif des locaux par le biais des composants froids le jour. Les concepts de bâtiments et d'installations, qui prévoient des systèmes de composants thermoactifs à forte inertie, exigent au cours de processus de planification adaptés et fiables l'utilisation d'outils de simulation de bâtiment modernes, afin d'obtenir des affirmations fondées en matière de confort et de besoins énergétiques.

La transmission thermique est déterminante: L'échange de chaleur entre les composants thermoactifs et le local peut être calculé au moyen d'un coefficient de transmission thermique combiné (α) pour le rayonnement et la convection. Pour les flux de chaleur horizontaux ou orientés vers le haut à la verticale, ce coefficient combiné est d'environ 7 à 8

Figure 5.3: Pourcentage des personnes non satisfaites, qui portent des pantoufles, en fonction de la température de la surface du sol

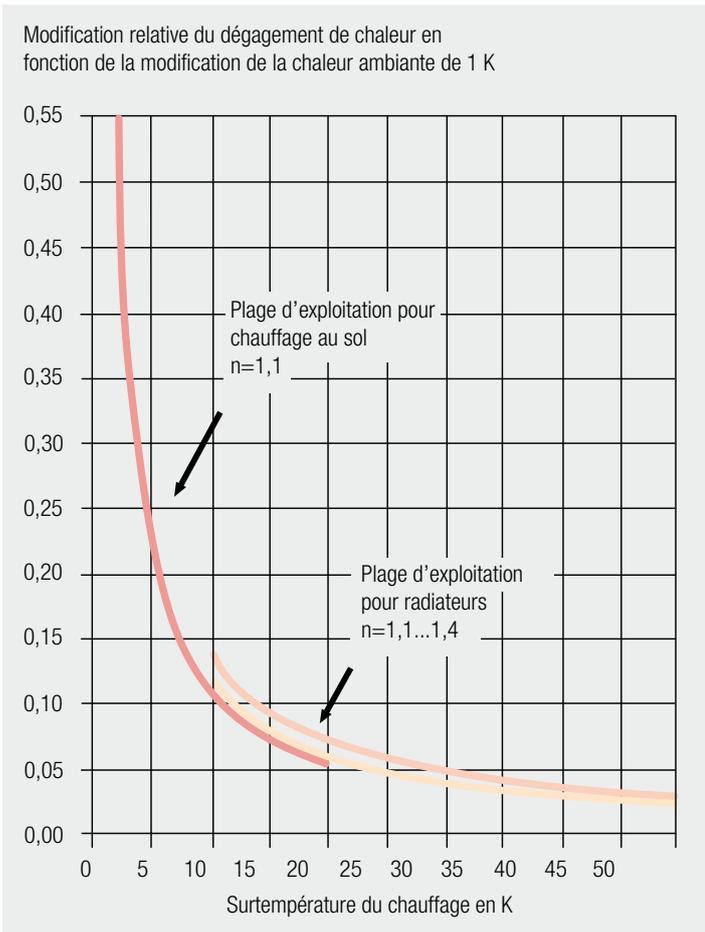
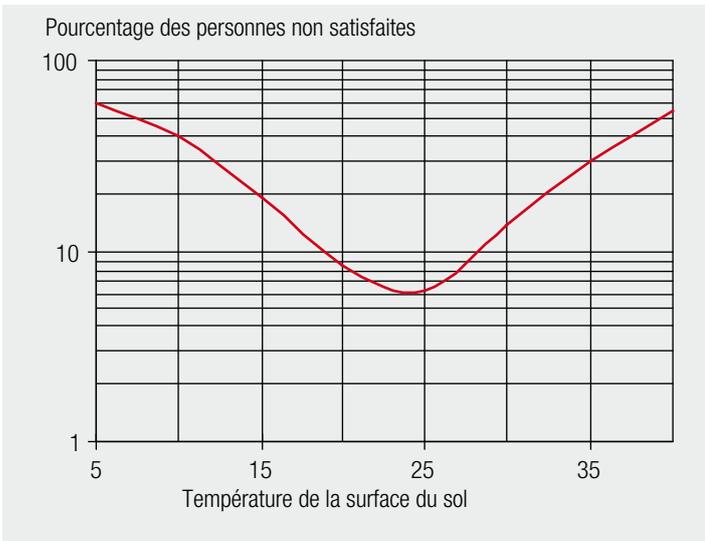


Figure 5.4: Effet d'autorégulation des systèmes de dégagement de chaleur

W/m² K (par convection environ 2 à 3 W/m² K, ceux par rayonnement environ 5 W/m² K). A une différence de température type de 6 K entre la surface du composant et l'air ambiant (température à la surface du composant de 19°C et température de l'air ambiant de 25°C), la transmission thermique est égale à environ 50 W/m². Si une puissance thermique de 50 W/m² agit pendant 24 heures à pleine puissance, la quantité de chaleur qui peut être transmise chaque jour au local est de 1,2 kWh/m².

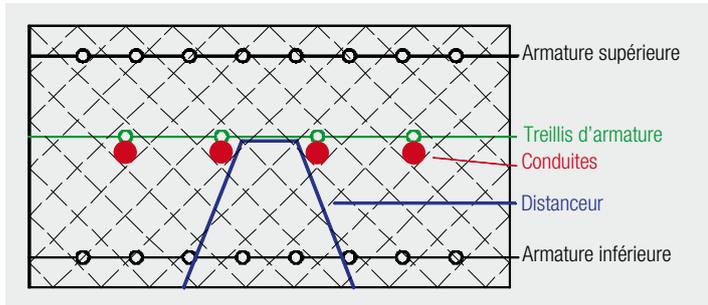
Chauffage par radiateurs

Avantages

- + Réagit rapidement aux changements de charge
- + Le corps de chauffe est accessible en permanence
- + Il est possible d'éviter l'arrivée d'air froid sur des surfaces froides en fonction de l'emplacement du radiateur

Figure 5.5: Coupe détaillée

Figure 5.6: Bâtiment administratif avec 6000 m² de composants thermoactifs (Photo: Vesca)



Inconvénients

- Rendement thermique plus faible à températures de départ basses
- Mauvaise répartition de la température sur la hauteur des pièces
- Sols froids avec dalles
- Exige des surfaces de radiateurs relativement grandes

Avec les systèmes de chauffage par radiateurs, les surfaces de chauffe (surfaces qui contribuent activement au dégagement de la chaleur) varient également en fonction des températures du système et des besoins de chauffage. Des limites ont également été imposées en ce qui concerne les façades (surfaces à l'avant des surfaces de chauffe) et le choix des matériaux.

Indications pour la planification

- Choisir les températures de départ les plus basses possibles
- Choisir une petite différence de température entre la température de départ et de retour

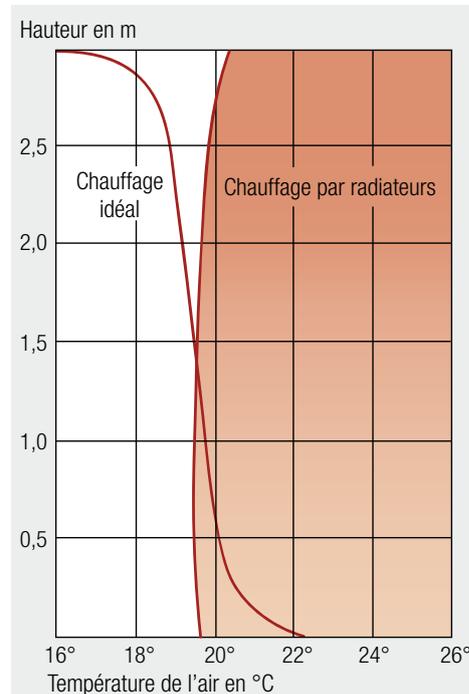


Figure 5.7: Courbe de température avec un chauffage par radiateurs

- Tenir compte de la différence de température lors du choix du fluide réfrigérant (glissement de température)
- En cas de revêtement en parquet, tenir compte de la température de départ maximale des conduites situées dans les combles (déformation concave)

5.2

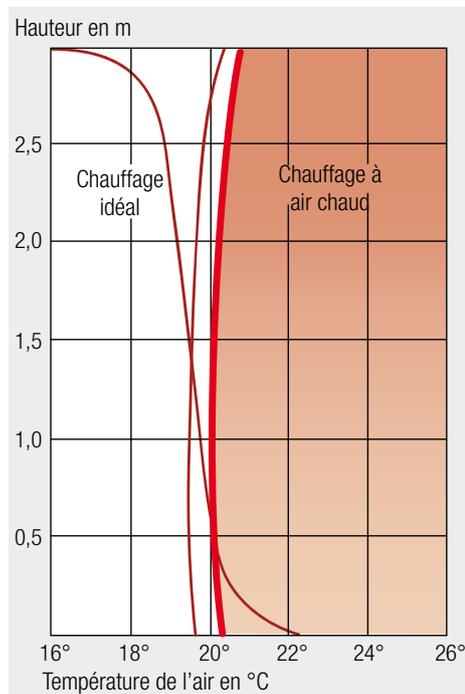
Installations de climatisation

Chauffage à air chaud

Systèmes: Le chauffage à air chaud pour maisons passives et Minergie P constitue une alternative possible aux systèmes de dégagement de chaleur à circulation d'eau. Il exige une planification minutieuse.

Avantages

- + Réagit rapidement aux changements de charge
- + Le système de dégagement de chaleur est accessible en permanence lorsqu'il n'est pas scellé dans le béton
- + Un seul système de chauffage



Inconvénients

- Un plus faible dégagement de chaleur à basses températures de départ
- Mauvaise répartition de la température sur la hauteur des pièces
- Sols froids avec dalles
- Arrivée d'air froid possible sur des surfaces froides
- Hygiène dans le réseau de conduites d'air
- Exige une température de condensation supérieure (mauvais COP)

Indications pour la planification

- Choisir les températures d'air pulsé les plus basses possibles
- Tenir compte de la différence de température lors du choix du fluide réfrigérant (glissement de température)
- Eviter l'installation d'une entrée d'air pulsé dans les pièces habitées

5.3

Production d'eau chaude sanitaire

Systèmes: On distingue deux systèmes de production d'eau chaude sanitaire au moyen d'une pompe à chaleur.

Utilisation indirecte: L'eau est chauffée indirectement par un ou plusieurs échangeurs de chaleur du système de chauffage.

Utilisation directe: L'eau est chauffée directement par un ou plusieurs échangeurs de chaleur du circuit frigorifique. Naturellement, les deux systèmes peuvent également être combinés.

Utilisation indirecte

Avantages

- + Intégration simple à des raccords hydrauliques standardisés
- + Composants standard très accessibles

Figure 5.8: Courbe de température avec chauffage à air chaud

Inconvénients

- Fonctionnement en parallèle du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire uniquement possible à un faible rendement total de l'installation
- Rendement plus faible
- Températures de l'eau plus basses

Exemples types d'utilisation indirecte:

- Accumulateur avec échangeur à plaques à l'extérieur
- Accumulateur-registre
- Accumulateur combiné ou à spirale

Utilisation directe**Avantages**

- + Rendement plus élevé
- + Utilisation de la chaleur à bonne température grâce à la désurchauffe, à la condensation et au sous-refroidissement du fluide réfrigérant

Inconvénients

- L'existence d'échangeurs de chaleur séparés pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire constitue un avantage au niveau du fluide réfrigérant
- Des quantités plus importantes de fluide réfrigérant
- Accumulation de calcaire, donc nettoyage de l'échangeur de chaleur plus fréquent (désurchauffeur, condenseur)
- Le circuit lubrifiant-fluide réfrigérant doit être conçu dans un matériau de classe alimentaire

Découplage thermique à bonne température:

La hausse de température dans le système de production d'eau chaude sanitaire est généralement sensiblement supérieure à celle observée dans le système de production d'eau de chauffage. Cette

situation peut être utile dans la mesure où lors de la conception de la pompe à chaleur et lors du raccordement hydraulique les chaleurs de désurchauffe, de condensation et de sous-refroidissement sont prélevées à différents niveaux de température. Cette optimisation du prélèvement de chaleur peut être appliquée à divers systèmes.

- Echangeurs de chaleur séparés (désurchauffeur, condenseur, sous-refroidisseur).
- Mesures constructives en vue d'utiliser le sous-refroidissement et la désurchauffe dans le condenseur.

Exemples types d'utilisation indirecte:

- Accumulateur avec condenseur et sous-refroidisseur à l'extérieur
- Accumulateur avec zones de registre séparées pour la désurchauffe, la condensation et le sous-refroidissement
- Accumulateur avec registre simple

Indications pour la planification

- Dans les systèmes monovalents, il convient d'étudier l'utilisation d'un système de chauffage de secours électrique.
- Les mesures de prévention de la légionellose doivent être respectées dans l'ensemble du circuit d'eau chaude.
- La pompe à chaleur doit être utilisée toute l'année pour la production d'eau chaude et pas uniquement au cours de la saison de chauffage. Cet élément doit être pris en compte lors du dimensionnement des sondes géothermiques.
- Des températures trop élevées sur la surface de l'échangeur de chaleur favorisent l'accumulation de calcaire dans l'eau destinée à être chauffée.

- L'influence de la circulation doit être prise en compte.
- La stratification dans l'accumulateur d'eau chaude doit être garantie (vérifier les accumulateurs existants).
- Les échangeurs de chaleur dans l'accumulateur d'eau chaude doivent être conçus pour la puissance maximale de la pompe à chaleur. (La puissance des pompes à chaleur air-eau est presque doublée en été.)
- Il convient de respecter les directives générales et locales en matière d'installations de production d'eau chaude.

5.4

Autres systèmes

Chauffe-eau à pompe à chaleur

Le chauffe-eau à pompe à chaleur est une unité compacte composée d'une pompe à chaleur air-eau et d'un accumulateur. L'énergie nécessaire provenant de l'air peut être extraite du local d'installation, d'un local voisin ou de l'air évacué, etc. L'air est refroidi et déshumidifié, c'est-à-dire que le local choisi est par exemple une pièce de stockage ou de séchage.

Indications pour la planification

- Le bilan énergétique doit faire l'objet de vérifications approfondies afin d'éviter la subtilisation de chaleur par les pièces chauffées.
- Prévoir une très bonne isolation thermique par rapport aux pièces chauffées.

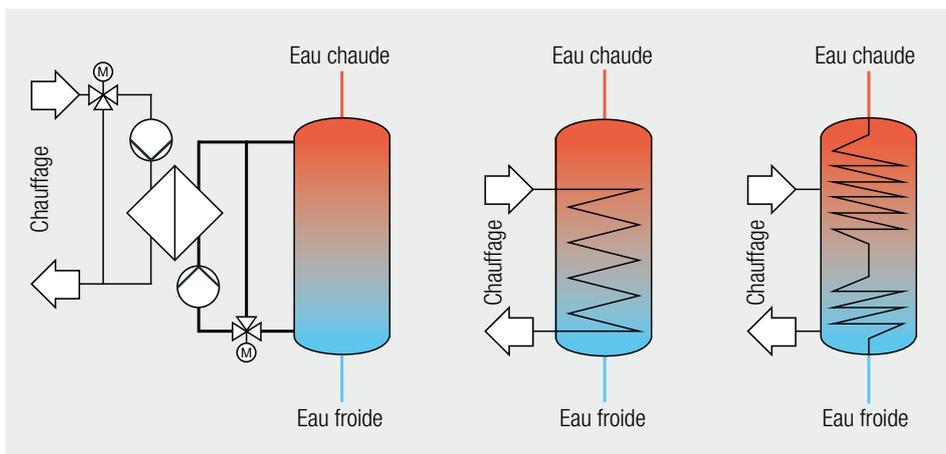


Figure 5.9: Systèmes de production d'eau chaude indirecte

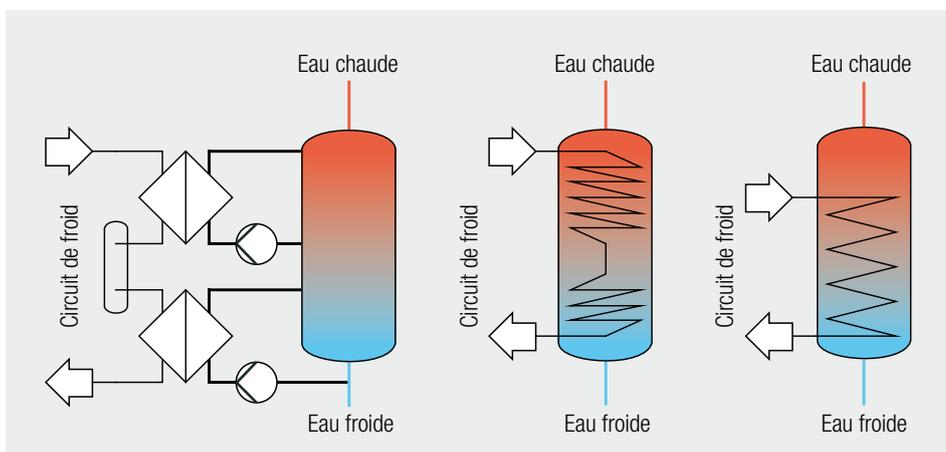


Figure 5.10: Systèmes de production d'eau chaude directe

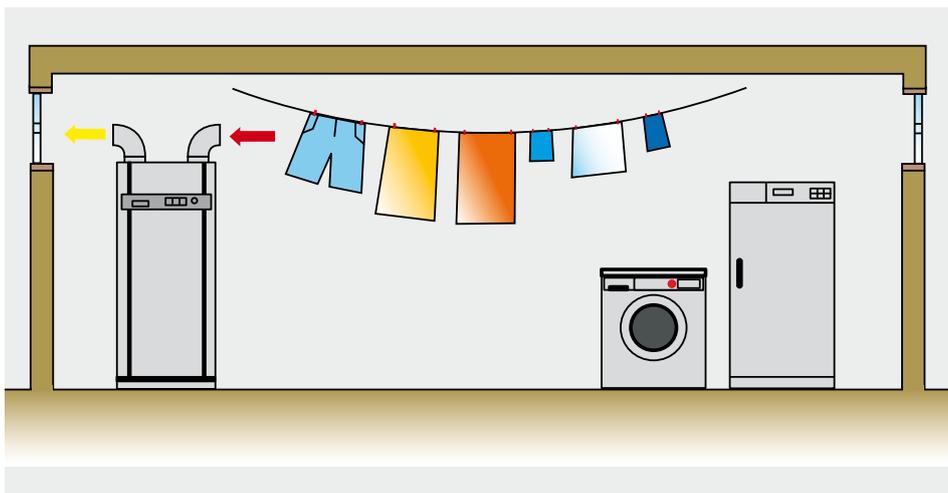
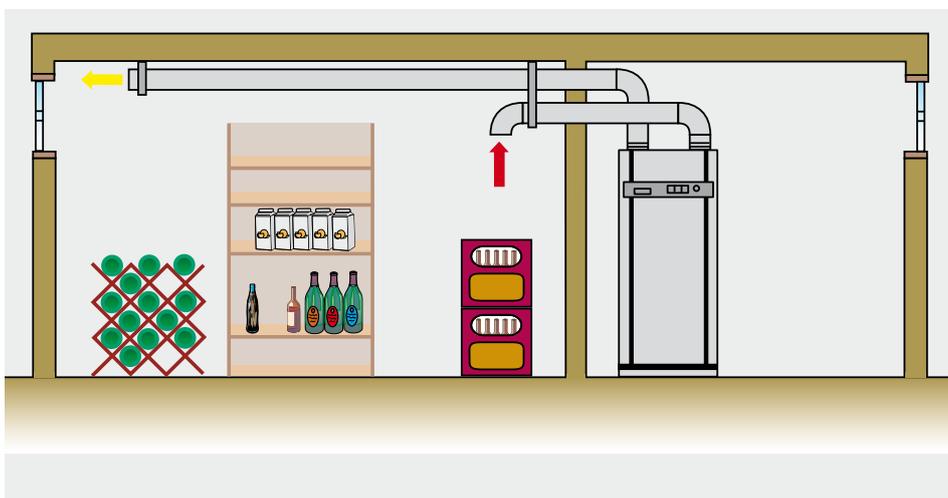
- En cas d'urgence, prévoir un corps de chauffe électrique supplémentaire.
- Les mesures de prévention de la légionellose doivent être respectées dans l'ensemble du réseau d'eau potable.
- Evacuation du condensat nécessaire
- Veiller au lieu d'installation pour une pompe à chaleur air-eau (acoustique, encrassement, limites de construction).
- Respecter les directives (autorisations)

Pompe à chaleur pour piscine

Pompe à chaleur air-eau pour le chauffage de piscines extérieures à la saison chaude.

Indications pour la planification

- Veiller au choix des matériaux pour les composants.



Figures 5.11 et 5.12:
Exemples de placement
d'échangeurs de chaleur-
pompes à chaleur pour
le refroidissement des
pièces (en haut) et leur
déshumidification (en
bas)

6.

Intégration dans les installations techniques

6.1

Principes

La pompe à chaleur est intégrée à l'installation technique via le système hydraulique. L'interface sera réalisée de manière à garantir un fonctionnement efficient du point de vue énergétique, économique et fiable. Les points suivants sont à respecter::

- Raccordement hydraulique
- Purge de l'installation avant le raccordement de la pompe à chaleur
- Dégagement de la puissance thermique
- Degré de couverture de la pompe à chaleur
- Débit d'air possible dans le cas d'une pompe à chaleur air-eau
- Processus de dégivrage dans le cas d'une pompe à chaleur air-eau
- Température de départ maximale
- Limites d'utilisation
- Adaptation aux cas de charge partielle
- Puissance disponible provenant de l'environnement
- Les prescriptions pour l'aération de la centrale de chauffe ainsi que la séparation physique entre la chaudière et la pompe à chaleur dépendent du type et de la quantité de fluide ainsi que du fluide énergétique supplémentaire.
- Protection contre le bruit

6.2

Modes de fonctionnement

Fonctionnement monovalent

En mode de **fonctionnement monovalent**, la pompe à chaleur fournit la puissance de chauffage nécessaire dans tous les états de fonction. La pompe à chaleur doit donc être dimensionnée en fonction de la puissance thermique maximale à installer dans le bâtiment pour la température de départ maximale nécessaire. (Figure 6.1)

Fonctionnement bivalent alternatif

La pompe à chaleur couvre la puissance thermique requise lorsque la température extérieure est relativement élevée (supérieure au point de bivalence). Pendant la période où les températures extérieures sont basses, la puissance thermique requise est fournie en totalité par un générateur de chaleur alternatif (chaudière à bois, à gaz, ou à mazout). La pompe à chaleur doit être réglée sur le point de bivalence et le deuxième générateur de chaleur doit être dimensionné en fonction de la puissance thermique maximale requise par le bâtiment. (Figure 6.2)

Le **point de bivalence** est fonction de différents critères:

- La puissance de raccordement nécessaire ou possible
- Le souci d'éviter le dégivrage

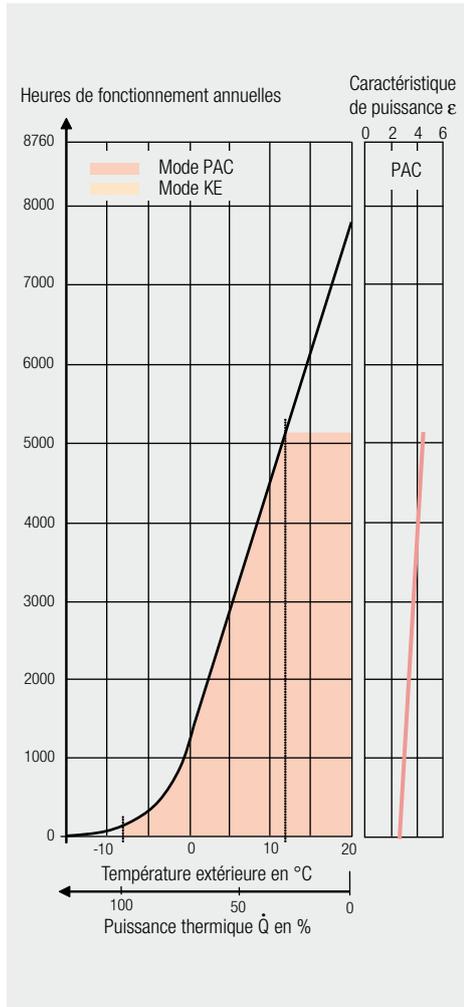


Figure 6.1: Fonctionnement monovalent

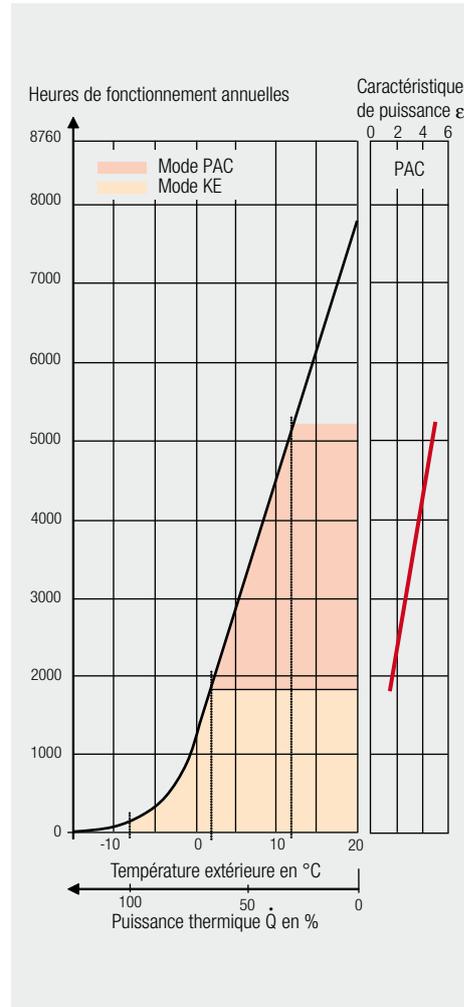
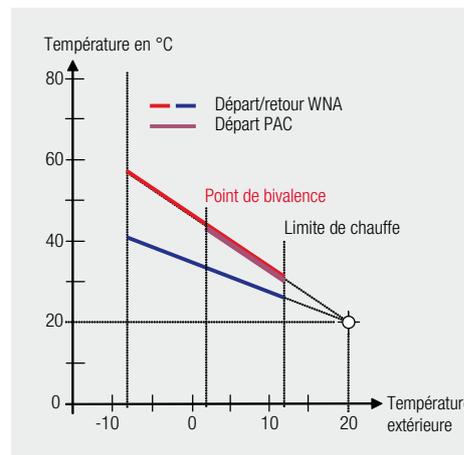
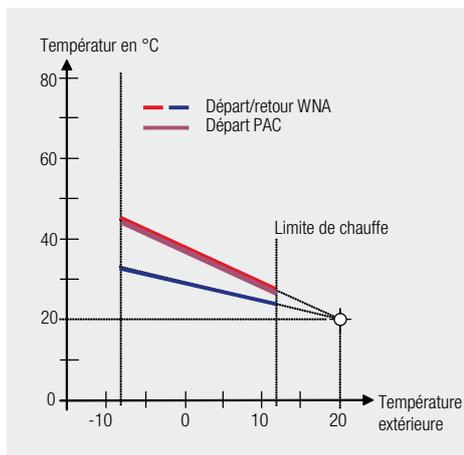


Figure 6.2: Fonctionnement bivalent alternatif



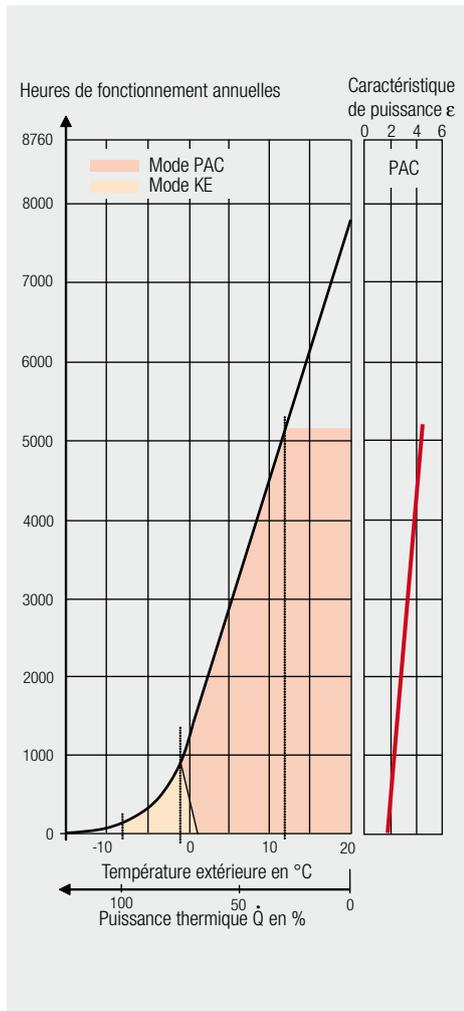
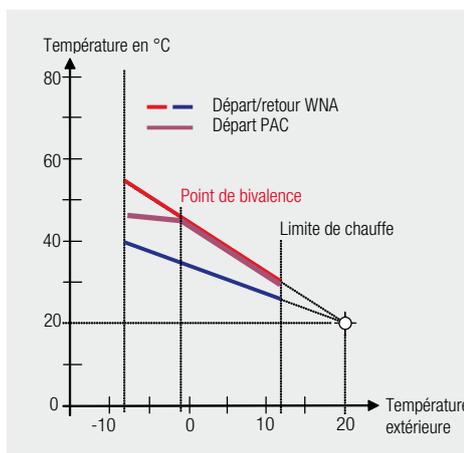


Figure 6.3: Fonctionnement bivalent parallèle ou bivalent partiellement parallèle



■ La température de départ maximale **Encombrement du chauffage complémentaire:** La citerne à mazout, la chaudière, les accumulateurs et la cheminée nécessitent de l'espace supplémentaire.

Fonctionnement bivalent parallèle ou bivalent partiellement parallèle

Le mode **bivalent partiellement parallèle** est caractérisé par le fait que les générateurs de chaleur fonctionnent de manière simultanée pendant un certain laps de temps. La pompe à chaleur couvre la puissance thermique requise pour des températures extérieures élevées (supérieures au point de bivalence).

Lorsque la température extérieure descend sous le point de bivalence, le deuxième générateur de chaleur (chaudière à bois, à gaz ou à mazout) se met également en route. Pendant cette phase, les deux appareils travaillent en parallèle. (Figure 6.3)

En mode **partiellement parallèle**, la pompe à chaleur s'arrête totalement lorsque la température extérieure descend en dessous d'une température donnée. Ceci concerne surtout les pompes à chaleur air-eau. Ce n'est donc qu'en mode partiellement parallèle que le deuxième générateur de chaleur (chaudière) doit être dimensionné en fonction de la puissance totale requise.

Fonctionnement mono-énergétique

La puissance maximale d'une installation de petite taille ne devant être disponible que pendant une période relativement courte, on choisira, dans le cas d'une maison individuelle, une pompe à chaleur air-eau fonctionnant en combinaison avec un chauffage complémentaire électrique destiné à couvrir les besoins de pointe, la pompe à chaleur continuant

alors à fonctionner. Le fonctionnement mono-énergétique est le fonctionnement parallèle d'une pompe à chaleur et d'un corps de chauffe électrique. (Figure 6.4)

Indications pour la planification

- Un accumulateur n'est nécessaire que lorsque le bâtiment ne dispose (presque) pas de capacité de stockage de chaleur (p. ex. chauffage par radiateurs avec une contenance d'eau limitée).

Dans le cas d'une pompe à chaleur saumure-eau ou eau-eau, le point de bivalence ne dépend qu'indirectement de la température extérieure. Le **point de bivalence** est déterminé en fonction de différents critères:

- Puissance de raccordement électrique nécessaire ou possible
- Puissance disponible provenant de l'environnement
- Température de départ nécessaire
- La part de couverture assurée par le radiateur électrique devrait être aussi basse que possible.

6.3

Système hydraulique

Différence de température et débit volumique au niveau des échangeurs de chaleur

La différence de température au niveau des échangeurs de chaleur détermine le débit, la hauteur de refoulement et la consommation électrique des circulateurs ou ventilateurs concernés.

Les systèmes de dégagement de chaleur sont réglés, suivant la température requise du fluide de chauffage, entre max. 50/40 °C pour les radiateurs (60 °C possibles en cas d'assainissement) et min. 25/22 °C pour les chauffages de surface. Les systèmes de chauffage au sol auto-

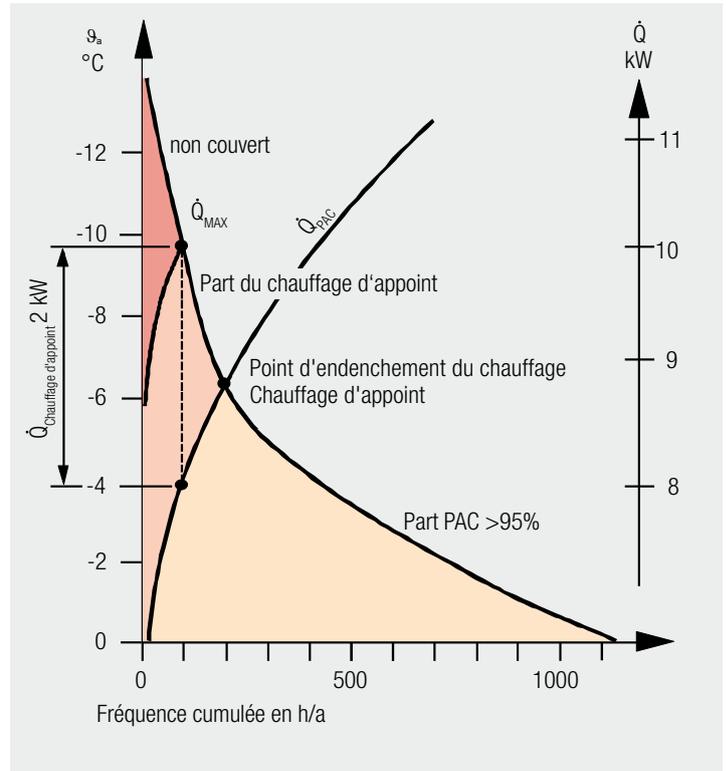


Figure 6.4: Fonctionnement mono-énergétique d'une pompe à chaleur air-eau pour une maison individuelle

régulés, de plus en plus fréquemment installés, n'ont pas de vannes thermostatiques, et ne requièrent donc pas de découplage hydraulique.

Découplage hydraulique: La réduction de la charge du bâtiment, par exemple lorsque les températures extérieures sont relativement hautes, fait que le débit volumique des consommateurs diminue. Afin de pouvoir s'adapter à cette modification de la consommation, les pompes à chaleur ne disposant pas de modulation doivent être équipées d'un dispositif de séparation hydraulique, consistant en un accumulateur, un by-pass ou une soupape de décharge. Les pompes à chaleur équipées d'un dispositif de modulation peuvent fonctionner sans découplage hydraulique. (Figure 6.5)

Accumulateur thermique: Un accumulateur permet d'assurer la transition entre les temps de délestage de l'entreprise

de distribution électrique, de manière à pouvoir négocier un tarif plus intéressant avec cette dernière. Il peut être utile de distinguer les types d'accumulateurs suivants:

Accumulateur technique: Cet appareil assure la séparation hydraulique et une fréquence d'enclenchement admissible maximale.

Accumulateur thermique: Il permet de stocker l'énergie thermique afin de couvrir les pointes et assurer la transition entre les temps de délestage, avec une augmentation minimale de la contenance de l'installation (masse d'accumulation).

Stratégies pour la charge de l'accumulateur

Charge par étapes: Lorsque l'accumulateur thermique est chargé par étapes, le débit volumique passant par le générateur de chaleur reste constant. Le générateur de chaleur ne peut augmenter la température de retour que d'un gradient de température donné. Ainsi, la température d'accumulation est augmentée d'une petite différence à chaque passage.

Cette méthode donne de meilleurs coefficients de performance que la charge par stratification, surtout lors du premier cycle de charge. Toutefois, le système ne dispose ainsi que de températures de départ variables. (Figure 6.6)

Charge par stratification: Lors de la charge en couches stratifiées de l'accumulateur, la température du générateur de chaleur est réglée sur une valeur de consigne donnée au moyen d'une régulation de charge, et ce indépendamment de la température de retour du consommateur. La température de consigne peut être réglée sur une valeur constante ou sur une valeur variable (p. ex. en fonction de la température extérieure). La

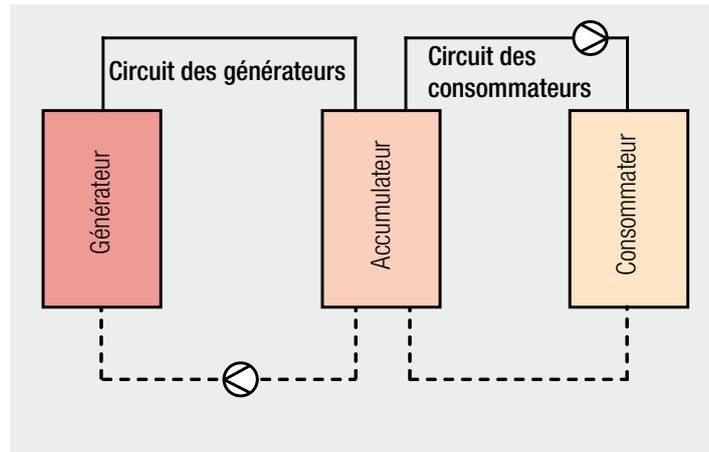


Figure 6.5: Le débit volumique via le circuit générateur doit toujours être dimensionné plus généreusement que le circuit des consommateurs: $m_{Gén.} > m_{Cons.}$

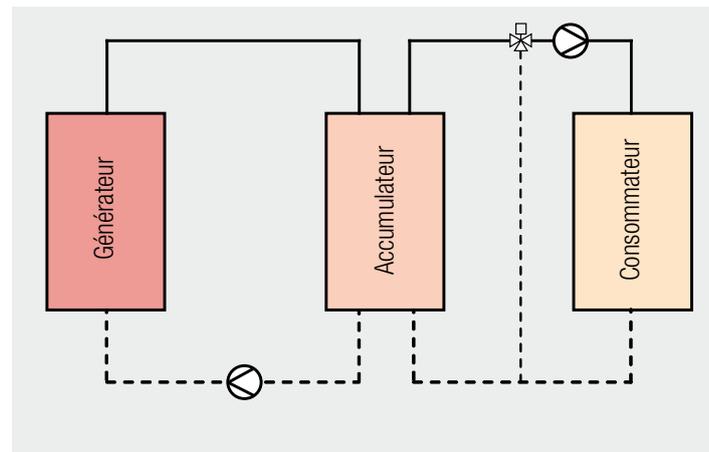


Figure 6.6: Commande hydraulique pour la charge par étapes

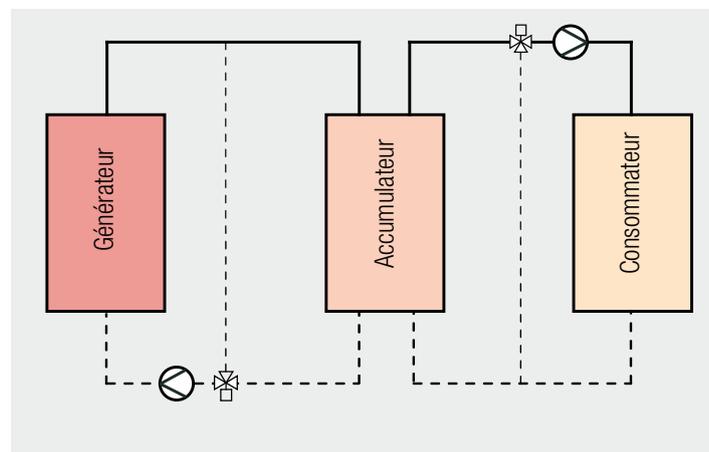


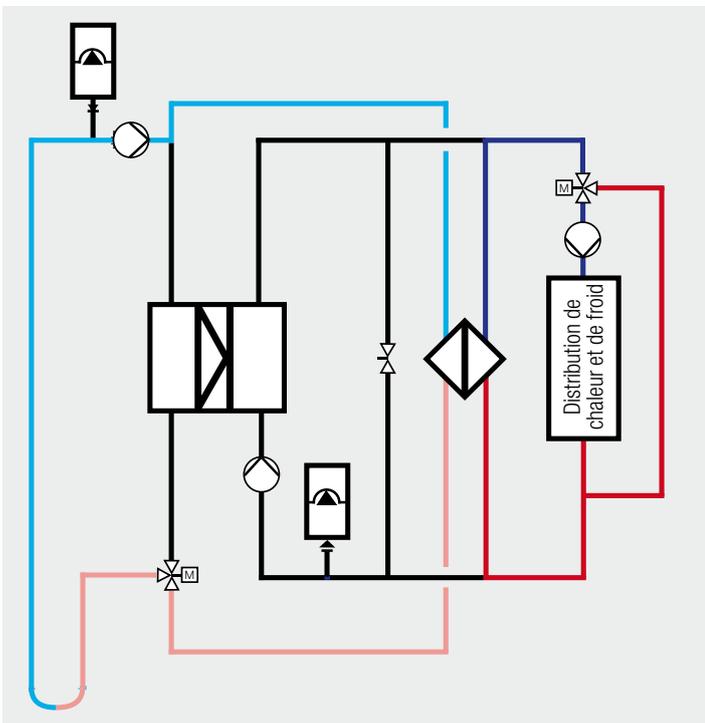
Figure 6.7: Commande hydraulique pour la charge par stratification

charge par stratification présente l'avantage de charger l'accumulateur à une température bien définie, de sorte que le consommateur dispose à son tour d'une température bien définie. (Figure 6.7)

Indications pour la planification

- Pour allonger le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur, il faut une masse d'accumulation suffisante. Celle-ci peut se trouver dans la masse du bâtiment (chauffage au sol, système de composants thermoactifs) ou dans un accumulateur thermique.
- Les accumulateurs thermiques (faible contenance en eau) sont surtout employés comme séparation hydraulique (p. ex. dans le cas de plusieurs groupes de chauffage).
- Les raccordements des accumulateurs thermiques hydrauliques doivent, si possible, se faire par l'intermédiaire d'un thermosiphon, et être bien isolés.

Figure 6.8: Refroidissement direct avec des sondes géothermiques



Le système hydraulique dans les installations de refroidissement

En été, la terre étant plus froide que la température ambiante, il est possible d'exploiter cette fraîcheur afin de refroidir les pièces de l'immeuble par le biais d'un système de chauffage au sol ou par les murs, ou d'un système à éléments thermoactifs.

Fonctionnement: Un échangeur de chaleur à plaques est intégré dans le circuit de saumure. La température de refroidissement minimum (température du point de rosée) est régulée par un mélangeur à 3 voies et le circulateur est enclenché et déclenché par une sonde de température ambiante. Pour éviter l'eau de condensation (température inférieure au point de rosée) sur les surfaces de refroidissement, il est nécessaire de disposer d'un dispositif de contrôle de la température de départ.

Avantages

- + Construction simple
- + Régénération supplémentaire du terrain
- + Frais d'exploitation minimaux

Inconvénients

- Puissance de refroidissement limitée (avec des sondes géothermiques)

Valeurs indicatives pour les puissances de refroidissement de la restitution de chaleur.

- Sonde géothermique env. 30 W/m: La sonde géothermique doit être dimensionnée en fonction de la puissance de refroidissement nécessaire.

Valeurs indicatives pour les puissances de refroidissement de l'absorption de chaleur.

- Chauffage par les murs env. 50 W/m²
- Chauffage au sol env. 25 W/m²
- Chauffage par plafond (système à éléments thermoactifs) env. 30 à 40 W/m²

Refroidissement par inversion du cycle dans la pompe à chaleur: Les pompes à chaleur à saumure permettent de refroidir les pièces par une inversion du cycle.

Fonctionnement: En été, la pompe à chaleur peut servir de machine de refroidissement grâce à une vanne d'inversion à 4 voies. L'utilisation d'un accumulateur de froid est nécessaire.

La température de refroidissement minimum (température du point de rosée) est réglée par un mélangeur à 3 voies et le circulateur est enclenché et déclenché par une sonde de température ambiante.

Avantages

- + Peu coûteux, comme il y a déjà une pompe à chaleur
- + Grande puissance de refroidissement
- + Régénération supplémentaire du terrain

Inconvénients

- Frais d'électricité pour le fonctionnement de la pompe à chaleur
- Un modèle particulier de pompe à chaleur est nécessaire.

Refroidissement par inversion du cycle dans le système hydraulique

Fonctionnement: Des robinetteries de commutation font transiter le circuit de chauffage par l'évaporateur et le circuit de la source de chaleur par le condenseur.

Avantages

- + Pompe à chaleur conventionnelle
- + Peu coûteux
- + Grande puissance de refroidissement
- + Régénération supplémentaire du terrain

Inconvénients

- Frais d'électricité pour le fonctionnement de la pompe à chaleur

Indications pour la planification: Des vannes thermostatiques spéciales, convenant pour le froid comme pour le chaud, sont nécessaires. Les vannes thermostatiques de chauffage conventionnelles se ferment lorsque les températures ambiantes sont basses.

6.4 Circulateurs

Le dimensionnement des circulateurs dépend des facteurs suivants:

- Débit volumique
- Perte de pression
- Point de fonctionnement défini lors du dimensionnement
- Durée de fonctionnement

Débit volumique

Le débit volumique est calculé selon la formule:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{\text{départ}} - \theta_{\text{retour}})}$$

soit:

\dot{V} = débit volumique en m³/s

\dot{Q} = puissance thermique en W (J/s)

ρ = densité du fluide en kg/m³

c = capacité thermique spécifique en J/kg K

θ = température du fluide en °C

Perte de pression

La perte de pression dans un circuit est déterminée par la taille (extension et longueur) de ce circuit, le débit volumique de la circulation, les diamètres des conduites et les éléments intégrés dans le circuit. Tous les composants de l'installation susceptibles de provoquer une perte de pression dans le circuit concerné doivent être pris en compte. Les diagrammes de pompe indiquent les différentes hauteurs de refoulement. La formule suivante permet de convertir la perte de pression (Pa) en hauteur de refoulement (m):

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$$

H = hauteur de refoulement en m

Δp = perte de pression en Pa

ρ = densité du fluide en kg/m³

g = accélération due à la pesanteur en m/s²

Durée de fonctionnement

Les circulateurs ne doivent fonctionner que pendant la période où il faut transporter une puissance thermique (dans la mesure permise par la régulation). Toute durée de fonctionnement inutile du circulateur consomme de l'énergie électrique, réduit l'efficacité énergétique et augmente les frais.

La régulation peut commander les pompes de manière électronique ou au moyen d'un programmateur horaire.

Si le système hydraulique le permet, il est possible d'utiliser des circulateurs à vitesse de rotation variable. De cette manière, la pompe ne fait circuler que le volume strictement requis, de manière à économiser l'énergie et à réduire les coûts énergétiques.

7. Acoustique et protection contre le bruit

7.1

Valeurs limites légales

Immissions du bruit dans le voisinage

En Suisse, l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) régit la détermination et l'évaluation des immissions du bruit en extérieur à l'aide de valeurs limites d'exposition. Les immissions du bruit causées par les pompes à chaleur sont évaluées conformément à l'annexe 6 de l'OPB. Pour les installations neuves fixes ou en cas de remplacement d'installations existantes (OPB → article 7), les valeurs de planification sont déterminantes.

Le degré de sensibilité II (DS II) concerne les zones dans lesquelles aucune exploitation susceptible d'occasionner une

gêne n'est autorisée, à savoir les zones d'habitation ainsi que les zones comprenant des bâtiments et installations publiques.

Le degré de sensibilité III concerne les zones dans lesquelles les exploitations susceptibles d'occasionner une gêne modérée sont autorisées, à savoir les zones d'habitation et artisanales (OPB → article 43).

Les communes sont compétentes en matière d'affectation des degrés.

Exigences relatives aux pièces dans lesquelles séjournent des personnes, telles que les salles de séjour et chambres à coucher, les bureaux, etc. Les valeurs limites de bruit légales doivent être respectées. Lors

Tableau 7.1: Valeurs limites d'exposition pour le bruit de l'industrie et de l'artisanat (DS: degré de sensibilité).

Valeurs de planification L_p en dB(A)	
	nocturne (19h à 7h)
Zone d'habitation (DS II)	45
Zone mixte (DS III)	50

Niveau d'évaluation $L_{r,h}$ en dB(A)	
	nocturne (22h à 6h)
Exigences minimales	30
Exigences plus sévères	25

Tableau 7.2: Exigences posées à la protection contre le bruit des installations techniques dans les maisons familiales et les bâtiments administratifs (norme SIA 181)

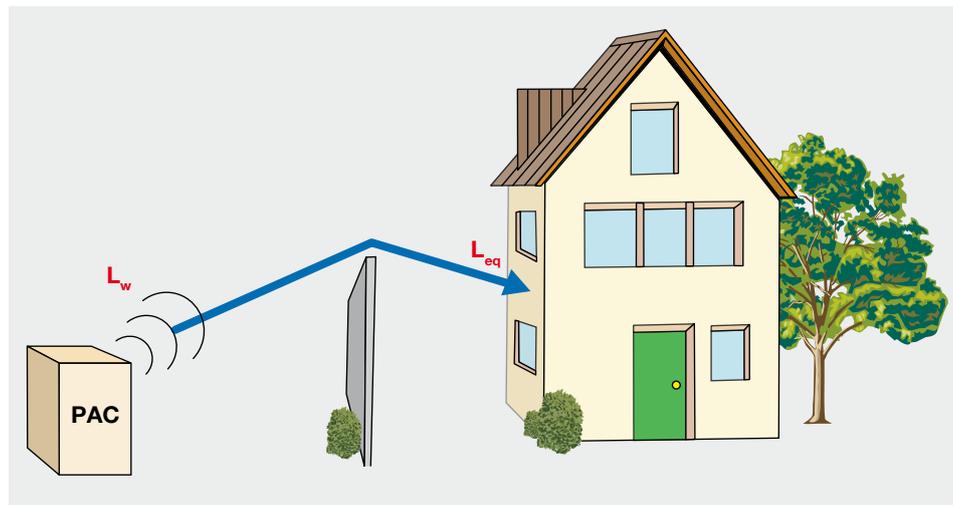


Figure 7.1: L_w est l'intensité sonore à la source, L_{eq} est le niveau moyen (niveau de pression acoustique), mesuré dans une fenêtre ouverte. L_p est le niveau d'évaluation compte tenu des corrections de niveau.

d'une installation en extérieur d'une pompe à chaleur air-eau notamment, il est impératif de prendre en compte les bâtiments alentour, ainsi que l'orientation des chambres à coucher et des salles de séjour.

La combinaison de données de mesure acoustiques (niveaux) avec des règles empiriques relatives à la gêne causée par des bruits spécifiques (corrections) permet de définir des critères d'évaluation de situations de bruit, qui décrivent de manière appropriée la réaction moyenne. Il en résulte une grandeur appelée niveau d'évaluation L_r , exprimée en dB.

7.2 Mesures de réduction du bruit

Lors de la planification d'installations de pompe à chaleur, une évaluation soigneuse des émissions sonores est nécessaire. Lorsque les mesures de réduction du bruit sont prises en compte très tôt dans le processus de développement, les coûts supplémentaires qui en résultent peuvent être réduits à un minimum. A l'inverse, des mesures mises en œuvre ultérieurement impliquent souvent une dépense supplémentaire extrêmement élevée et exigent beaucoup d'efforts.

Émissions sonores

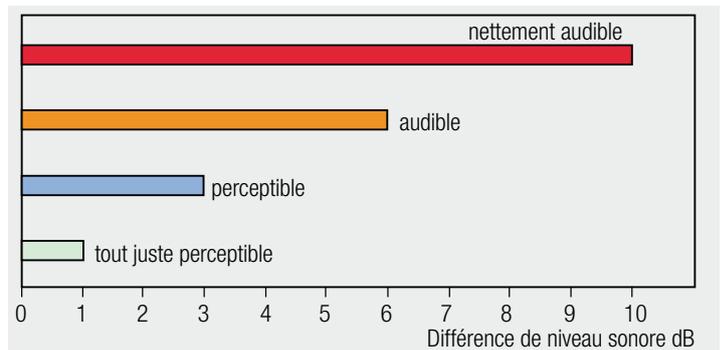
Bruit aérien: Il convient de prévoir une carrosserie insonorisante de la pompe à chaleur ou, dans le cas de grandes installations, une isolation sonore ou un revêtement insonorisant de la pièce. On peut éventuellement envisager l'intégration d'atténuateurs lamellaires pour les ouvertures d'entrée et de sortie de l'air.

Bruit solidien: Une utilisation importante de raccords flexibles (tuyaux, compensateurs, manchettes élastiques, connexions

Niveau sonore	Source de bruit	Pression acoustique
170 dB	Fusil d'assaut	
160 dB	Pistolet 9 mm	1 000 000 000 μ Pa (1 kPa)
150 dB	Cloueuse	
140 dB	Avion à réaction (banc d'essai)	100 000 000 μ Pa (100 Pa)
130 dB	Seuil de douleur	
120 dB	Tunnelier	10 000 000 μ Pa (10 Pa)
110 dB	Marteau-piqueur	
100 dB	Discothèque	1 000 000 μ Pa (1 Pa)
90 dB	Chaîne de montage	
80 dB	Trafic routier	100 000 μ Pa (100 mPa)
70 dB	Conversation	
60 dB	Bureau	10 000 μ Pa (10 mPa)
50 dB	Séjour	
40 dB	Salle de lecture	1000 μ Pa (1 mPa)
30 dB	Chambre à coucher	
20 dB	Studio radiophonique	100 μ Pa
10 dB	Seuil d'audibilité	
0 dB		20 μ Pa

Tableau 7.3: Valeurs typiques pour la pression acoustique que l'ouïe peut percevoir sur une plage extrêmement grande.

Figure 7.2: Il faut une modification de 8 dB à 10 dB pour percevoir un bruit, c'est-à-dire la différence audible de l'augmentation du niveau sonore. La plus petite modification audible est d'env. 1 dB.



électriques flexibles) permet d'empêcher les bruits solidiens. Pour réduire les vibrations de la pompe à chaleur, il convient d'utiliser des amortisseurs de vibrations disposés entre la pompe à chaleur et le socle de celle-ci, ou entre le socle de la pompe à chaleur et le sol en béton.

Causes du bruit

Dans les installations de pompe à chaleur air-eau, le bruit perceptible dans le voisinage est, dans la plupart des cas, causé par le ventilateur. L'ouverture d'amenée d'air directement raccordée au ventilateur émet nettement plus de bruit que l'ouverture d'amenée d'air côté évaporateur. Malgré l'importance en général prédominante du bruit du ventilateur, il ne faut toutefois pas négliger les autres sources de bruit, telles que les émissions sonores du compresseur, les bruits d'écoulement, la régulation du balourd, les bruits électriques et les bruits de commutation lors du dégivrage.

Répartition du bruit

Le soin porté à l'installation de la pompe à chaleur est également primordial. La disposition de la pompe à chaleur dans un conduit de descente du linge, disposé entre les chambres à coucher et la buanderie, ne permet pas d'offrir une isolation suffisante.

De même, les conduites de raccordement (source de chaleur, distributeur de chaleur et câbles électriques) doivent être flexibles et être montées séparément du corps de la construction (fixations insonorisantes).

Mesures de réduction du bruit

Toutes les mesures de réduction du bruit présentées dans la figure 7.3 doivent être prises en compte lors de la planification et de la réalisation.

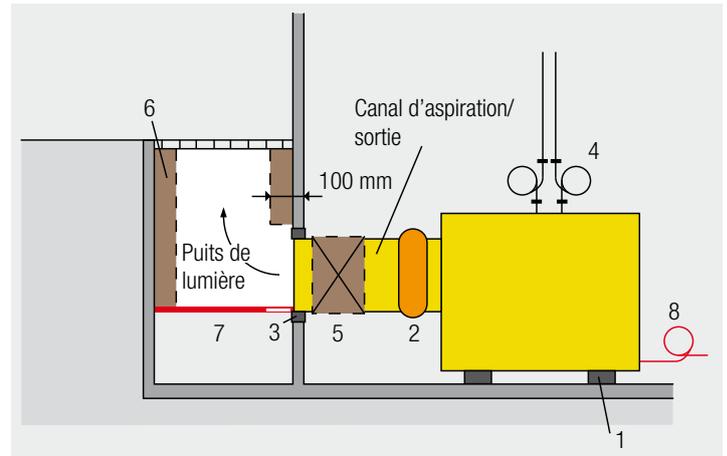


Figure 7.3: Mesures de réduction du bruit

- 1: Séparation des bruits solidiens entre la pompe à chaleur et le sol de la cave
- 2: Séparation des bruits solidiens entre la pompe à chaleur et le canal (le soufflet ne doit pas être tendu)
- 3: Séparation des bruits solidiens entre le canal d'air et le bâtiment
- 4: Séparation des bruits solidiens entre la pompe à chaleur et les conduites de chauffage
- 5: Amortisseur de bruit à absorption dans les canaux d'air lors d'exigences plus élevées
- 6: Chicane avec chemisage absorbant
- 7: Amortisseur de bruit pour les basses fréquences lors d'exigences plus élevées (amortisseur de bruit à résonance)
- 8: Séparation des bruits solidiens entre la pompe à chaleur et les raccords électriques

Source: «Isolation acoustique lors de l'installation de pompes à chaleur», éditeur GSP

8.

Planification

8.1

Approvisionnement en électricité

Dans le cas des pompes à chaleur, des moteurs asynchrones relativement grands sont utilisés dans des installations domestiques. Dans les réseaux de conception fragile, leur démarrage peut engendrer des chutes de tension. C'est pourquoi les pompes à chaleur sont sujettes à autorisation. Étant donné que chaque fournisseur d'électricité est responsable de son réseau, il convient de prendre connaissance à l'avance des clauses de raccordement propres à l'exploitant du réseau compétent.

Raccordement et autorisations

Selon le fournisseur d'énergie et la puissance disponible ou le tarif, un cahier des charges est imposé à l'exploitant de la pompe à chaleur, relatif par exemple aux délestages ou limitations de puissance imposés pendant un laps de temps pouvant durer jusqu'à plusieurs heures en période de pointe, à une limitation du courant de démarrage, au nombre d'activations par heure, etc.

Dans les installations de grande taille, il peut également s'avérer économique pour l'exploitant d'équiper la pompe à chaleur d'un dispositif de compensation du courant réactif, car bon nombre de fournisseurs d'énergie, en présence d'un facteur de puissance trop bas (la plupart du temps pour un $\cos-\phi$ inférieur à 0,92), facturent en supplément la puissance

réactive correspondante, ou car cela permet également de choisir une ligne électrique plus petite et ainsi moins coûteuse. Les informations tarifaires (dans le meilleur des cas un tarif spécial pompes à chaleur), accompagnées des tableaux de délestage et des formulaires de demande, peuvent être obtenues auprès du fournisseur d'électricité compétent.

Limitation du courant de démarrage

La plupart des exploitants du réseau exigent, à partir d'une puissance de moteur donnée (la plupart du temps à partir de 3 kW), une limitation du courant de démarrage. Voici quelques exemples de réduction du courant de démarrage:

- Démarreur à résistances (petits compresseurs)
- Démarreur progressif (intégré de série dans la plupart des petites pompes à chaleur)
- Démarrage sur fraction d'enroulement (enroulement standard dans les compresseurs semi-hermétiques à partir d'une puissance moteur de 3 kW env.)
- Démarrage étoile-triangle (pour les compresseurs ouverts et les très gros compresseurs semi-hermétiques)
- Dans le cas des installations combinées (systèmes à plusieurs compresseurs), il convient de toujours choisir un démarrage échelonné des différents compresseurs.

Ces types de démarrages ou des combinaisons de ceux-ci permettent en général de satisfaire aux exigences des fournisseurs d'électricité. Les différences de tarifs peuvent être conséquentes, notamment pour les grandes installations, c'est pourquoi il est indispensable de prendre connaissance à l'avance des conditions locales en vigueur.

8.2

Centrale de chauffe

Les exigences relatives à la centrale de chauffe, en ce qui concerne son lieu d'implantation, les dispositifs de sécurité, l'aération, etc., peuvent s'avérer extrêmement complexes, notamment dans le cas de grandes installations et d'installations bivalentes.

Installation et accessibilité

- La pièce dans laquelle est installée une petite pompe à chaleur ayant une puissance de chauffe inférieure à 20 kW peut la plupart du temps faire l'objet d'une planification identique à celle d'une chaufferie traditionnelle. En cas d'utilisation de réfrigérants combustibles, la carrosserie de la pompe à chaleur ou la pièce d'installation doit être ventilée vers l'extérieur.
- Lorsque l'on souhaite installer une pompe à chaleur air-eau à l'intérieur d'une maison, une évacuation du condensat doit toujours être prévue.
- Seule une installation facile d'accès peut être correctement entretenue. Les indications du fabricant à ce sujet doivent être impérativement respectées.

Sécurité

- La protection des personnes représente un thème de première importance. Les réfrigérants aujourd'hui disponibles sur le marché sont, pour certains, toxiques ou combustibles. Selon la configuration de l'installation, il peut être nécessaire de convenir avec les autorités locales de la présence d'extincteurs, de dispositifs et équipements destinés à la protection des personnes, d'issues de secours, de secteurs coupe-feu, etc., ainsi que, dans certains cas, de réaliser une analyse des risques.
- Toutes les installations doivent être protégées contre des pressions du système trop élevées. Selon le type d'installation et la taille de celle-ci, les événements des soupapes de sécurité doivent mener directement à l'air libre ou dans un collecteur spécial; il convient à ce sujet de respecter les prescriptions et réglementations en vigueur.
- Les prescriptions et réglementations en vigueur indiquent si l'aération de la pièce dans laquelle est installée la pompe à chaleur doit être conçue en prévention de risques éventuels pour les personnes ou l'environnement, et de quelle manière. En cas de doute, contacter les autorités locales.

Conditions techniques

- Il convient de prendre en compte la protection contre le bruit et en particulier le bruit solidien lors de la planification et de l'installation. La situation géographique doit être étudiée dès la planification par les architectes ou les maîtres d'ouvrage, en tenant compte des espaces critiques en termes de bruit (chambre à

coucher, bureau, etc.) et des propriétés voisines.

- Dans le cas d'installations bivalentes avec des chaudières, il convient de veiller, lors de l'aération de la pièce, que l'aération de la pompe à chaleur n'exerce aucune influence sur l'arrivée d'air de combustion du système de chauffage à mazout, à gaz ou à bois.

8.3

Rentabilité

Remarques générales

La rentabilité d'installations énergétiques dépend des facteurs d'influence traditionnels: coûts de capital (amortissement et intérêts des coûts d'appareillage et d'installation), coûts énergétiques (p. ex. courant pour la pompe à chaleur), coûts d'utilisation et de maintenance.

Les grandeurs suivantes sont déterminantes lors du calcul de rentabilité:

Coûts d'investissement: Les coûts d'investissement comprennent toutes les dépenses nécessaires à la réalisation d'une installation.

Durée d'utilisation et période d'observation: La durée d'utilisation désigne la durée effective à laquelle on peut s'attendre entre la mise en service et le remplacement de l'installation.

Coûts annuels: Les coûts annuels, pour les systèmes énergétiques, sont (hormis les coûts de capital) les coûts d'énergie, de maintenance, d'exploitation et d'entretien.

Taux d'intérêts calculé: Le taux d'intérêts calculé est la grandeur la plus importante dans les calculs de rentabilité.

Il doit correspondre au taux d'intérêt en vigueur sur le marché pour l'intérêt du capital investi dans l'installation.

Coûts externes: Pour les coûts externes (y compris les coûts environnementaux ou l'augmentation prévue du coût de l'énergie), les valeurs doivent être choisies en fonction des dernières découvertes scientifiques disponibles ou de valeurs approuvées par les autorités fédérales.

Comparaison entre les différentes offres de pompes à chaleur: Lors de la comparaison entre les différentes offres de pompes à chaleur, il convient de prendre en considération les critères suivants.

Coûts

- Coûts d'investissement
- Coûts de maintenance
- Coûts d'exploitation (voir prestations)

Volume de livraison

- Intégralité
- Interfaces (choix et adéquation)
- Coûts relatifs à la construction
- Durée et conditions de la garantie

Prestations

- Coefficient de performance annuel (COPAn) à des conditions-cadres définies
- Coefficient de performance (COP) à 3 ou 4 conditions différentes, relatif à l'exploitation en pleine charge ou en charge partielle
- Puissance de chauffe
- Limites d'utilisation
- Perte de pression des échangeurs de chaleur
- Caractéristique TEWI (Chapitre 3.3)

Qualité

- Service du fournisseur (365 jours, 24 heures sur 24)
- Disponibilité des pièces de rechange
- Assurance qualité du système
- Références

8.4**Contrôle des résultats****Remarques générales**

Pour réaliser un contrôle des résultats, il est impératif de définir un concept de mesure dès la planification de l'installation de pompe à chaleur. Seule une connaissance préalable du processus et de l'instrumentation nécessaires permettra de réaliser plus tard un contrôle des résultats correct.

Concept de mesure

Le concept de mesure devrait comprendre les dispositifs et points de mesure suivants:

- Compteur d'électricité pour le compresseur
- Heures d'exploitation et compteurs d'impulsions pour le compresseur
- Compteur de chaleur pour chaque générateur de chaleur
- Manchon de mesure (si possible un manchon Twinlock), pour la saisie des températures d'entrée et de sortie dans l'évaporateur et dans le circuit du condenseur

En supplément pour les installations complexes et de grande taille:

- Températures d'entrée et de sortie à chaque échangeur de chaleur
- Température ambiante

- Température extérieure
- Transmission de puissance au compresseur
- Compteur des heures de service pour les pompes, les ventilateurs, les chauffages d'appoint etc.
- Compteur de chaleur selon la source de chaleur
- Positions des soupapes

Enregistrement des données

L'enregistrement des données peut s'effectuer manuellement ou automatiquement. Lors d'un enregistrement manuel des données (de préférence pour des installations simples et relativement petites), un protocole de mesure correspondant doit être établi. Pendant la période de mesure, les données doivent être enregistrées si possible toujours à la même heure. En fonction des phases d'exploitation et de charge, les données doivent être enregistrées de plusieurs fois par jour à une fois par mois.

Dans le cas des installations relativement grandes ou complexes, l'enregistrement des données n'est pertinent que s'il s'accompagne d'une mesure intensive avec des intervalles d'enregistrement très courts. Cela permet d'enregistrer les contextes dynamiques ainsi que les séquences de fonctionnement. Si un système de gestion électronique du bâtiment est disponible, l'enregistrement des données peut s'effectuer via ce système. Dans le cas contraire, les données doivent être enregistrées à l'aide d'un dispositif portable (p. ex. un enregistreur de données).

9.

Mise en service

Une fois la phase de montage terminée suivent la préparation et la mise en service. La réception et l'exploitation interviendront par la suite. L'étape de réception consistera à vérifier la conformité de l'installation avec le contrat d'entreprise et les règles de l'art. Après la mise en service, il est recommandé de vérifier à nouveau les réglages sous charge après 2 à 3 mois d'exploitation et ainsi d'optimiser en conséquence l'exploitation.

9.1 Phase avant la mise en service Contrôle du montage

A l'issue de la phase de montage, il est nécessaire de procéder à un contrôle approfondi du montage de l'équipement installé avant le remplissage du système hydraulique avec les fluides. Il s'agit donc de vérifier si l'installation est conforme aux spécifications et si les composants de l'équipement sont correctement montés. Il faut également s'assurer que tous les appareils et les pièces du système pourvus de plaquettes indicatrices sur lesquels figurent des numéros de référence sont montés conformément au schéma d'installation et aux autres documents.

Contrôle des dispositifs de mesure et de régulation

Il convient de définir dès l'étape de planification de l'installation les valeurs de mesure qui devront être enregistrées pour

la mise en service, la réception, l'optimisation d'exploitation et l'exploitation de l'installation. L'installation ultérieure de douilles plongées et d'instruments de mesure est généralement coûteuse. Le contrôle du montage est la dernière occasion de pouvoir appliquer des mesures de correction correspondantes sans engager des dépenses supplémentaires trop importantes. Avant de procéder au remplissage de l'installation avec le fluide caloporteur, les dispositifs de mesure et les organes de réglage, qui sont montés dans le circuit hydraulique, doivent subir un contrôle particulier. Il est important pour obtenir un enregistrement fiable des mesures que les dispositifs soient bien placés et correctement montés.

9.2 Préparation de la mise en service

Avant la mise en service, la phase d'installation, y compris les installations électriques et les équipements pour mesure, commande et réglage, doit être terminée. Afin que la mise en service se déroule avec efficacité, il convient avant toute chose de respecter les mesures préparatoires suivantes:

- Établir le programme de la mise en service, fixer les délais avec les personnes concernées; s'assurer de la disponibilité des fluides et des locaux.
- Les documents suivants doivent être mis à disposition sur l'installation:

- Schéma de principe de l'installation
- Fiche de données techniques avec paramètres de réglage, valeurs de consigne et courbes de régulation. Ces données doivent, dans la mesure où elles ont été fixées, être conformes aux valeurs du contrat.
- Schéma de l'arrivée du courant, de la commande électrique et de la régulation (schéma de régulation)
- Plan de montage de puissance pour moteurs électriques
- Descriptifs de fonctionnement
- Listes de données pour les débits massiques, les différences de pression, les températures dans le réseau, etc.
- Plans d'installation
- Au moins un exemplaire du projet d'instructions de service de toutes les installations ou pièces d'installation doit être mis à disposition pour la mise en service afin que les éventuels compléments ou corrections puissent y être ajoutés lors de la mise en service.

9.3

Source de chaleur et distribution de chaleur

Avant la mise en service effective de la pompe à chaleur, il convient de contrôler la source de chaleur et le système de distribution de chaleur et de procéder aux préparatifs correspondants.

- Vérifier que l'installation est complète
- Vérifier que les systèmes d'eau sont rincés, remplis et soigneusement purgés (l'essai de pression est effectué pendant les travaux d'installation avant la pose de l'isolation)
- Vérifier les débits volumiques, procéder à l'équilibrage hydraulique

- Vérifier la concentration du remplissage d'antigel (le cas échéant)
- Remplir les douilles plongées de liquide de contact
- Procéder au contrôle du sens de rotation sur les moteurs de pompes et ventilateurs et autres mécanismes d'entraînement (à l'exception du moteur du compresseur).
- Vérifier la source de chaleur sur les pompes à chaleur air-eau.

9.4

Mise en service de la pompe à chaleur

Avant la mise en service, il est impératif de s'assurer que toutes les pièces liées à l'installation telles que le circuit des consommateurs, le refroidissement, etc. sont prêtes à fonctionner, que l'alimentation électrique fonctionne et que la charge disponible est suffisante.

La mise en service se déroule en principe sous la direction du concepteur en technique du bâtiment, qui connaît le fonctionnement de l'installation sur le plan électrique, hydraulique et de la climatisation. Il est par conséquent assisté des spécialistes de la société de régulation, d'électriciens ainsi que des spécialistes de la mise en service des fournisseurs de composants. La procédure peut se dérouler comme suit:

- Contrôle visuel, contrôle de l'installation
- Contrôler les raccordements électriques de tous les appareils, vérifier les connexions électriques à l'aide du schéma électrique.
- Vérifier que les relais thermiques (paquets thermiques) sont correctement réglés conformément aux plaques signalétiques des moteurs, contrôler

les réglages des dispositifs de protection électrique.

- Débrancher le compresseur du réseau électrique
- Enclencher l'interrupteur général
- Enclencher le cas échéant les chauffages à mazout (chauffage du carter et du séparateur d'huile)
- Contrôler et vérifier dans la mesure du possible les fonctions de sécurité.
- Contrôler le sens de rotation du compresseur. Vérification réalisée exclusivement par un spécialiste du fournisseur.
- Procéder au contrôle fonctionnel des systèmes de commande et de régulation, contrôler l'exactitude des valeurs enregistrées.
- Soumettre toutes les connexions de régulation et de commande à un test de fonctionnement
- Régler les paramètres de réglage (zone proportionnelle, temps de dosage d'intégration, constante de temps), courbes de chauffe, valeurs de consigne, etc. suivant les valeurs calculées ou recommandées

9.5

Procès-verbal de mise en service

A l'issue de la mise en service les divers paramètres, tels que les valeurs de consigne, les courbes de régulation et les sécurités doivent être réglés conformément aux valeurs définies dans le contrat (le cas échéant). Les éventuels écarts et vices doivent être mentionnés.

Tous les paramètres de réglage importants doivent être consignés dans le procès-verbal de mise en service (voir également point 9.2).

Les écarts ou modifications doivent être consignés à la main dans les documents.

9.6

Instructions de service

Au cours de la mise en service, de petites modifications ou corrections quant à l'installation sont généralement apportées. Les adaptations concernant le schéma électrique doivent absolument être reportées dans la version définitive. Le projet d'instructions de service doit donc être adapté en conséquence (voir également chapitre 9.2).

Les instructions de service décrivent le fonctionnement et le réglage de chacune des pièces de l'installation. Elle doit être rédigée de manière claire et compréhensible. Ci-après quelques points à respecter lors de l'établissement des instructions de service:

- Adresses et numéros de téléphone des services correspondants
- Utiliser des désignations uniformes et les symboles conformément aux normes en vigueur
- Conformité avec les inscriptions mentionnées sur l'installation
- Ne pas utiliser de documents dans une langue étrangère
- Schéma électrique valable avec mention des modifications survenues lors de la phase de mise en service
- Joindre le procès-verbal de mise en service avec les données fondamentales telles que:
 - Lecture des caractéristiques de l'installation pendant le fonctionnement
 - L'ensemble des valeurs de réglage pouvant être modifiées par l'exploitant
 - Valeurs limites éventuelles
- Mesures à prendre en cas de dérangement
- Répertoire des tâches devant être effectuées par le personnel d'exploitation

- Procès-verbal vierge avec la liste des données consultables
- Carnet de service (pompe à chaleur)

9.7

Procès-verbal de réception

A l'issue des opérations de mise en service, il est procédé à un contrôle de l'installation en présence des personnes concernées. L'objectif de ce contrôle est la rédaction d'un procès-verbal signé par toutes les parties qui atteste de la réception de l'installation et consigne par écrit les éventuelles réserves. Lors de la réception, un procès-verbal de réception doit être rempli par le concepteur et signé par les parties. Ce document contiendra:

- Les caractéristiques contractuelles
- La liste de contrôle du volume de livraison et de la qualité de l'exécution
- Les données effectives relatives à l'installation
- Les éventuels défauts

Avec la réception, le maître de l'ouvrage assume la responsabilité de l'installation et le délai de garantie prend effet.

10.

Exploitation

10.1

Exploitation et contrôle des résultats

Les appareils de mesure installés sur le système doivent permettre d'effectuer un contrôle des paramètres d'exploitation. La mise en service est effectuée dans un cas normal dans des conditions définies. C'est pourquoi, il est important de contrôler la fonctionnalité et l'efficacité énergétique de l'installation dans des conditions modifiées. Ceci ne s'applique pas seulement à la phase qui suit directement la mise en service. Les éventuelles modifications relatives à l'installation doivent être portées à la connaissance de tous.

10.2

Surveillance de l'exploitation

Le personnel d'exploitation doit procéder régulièrement à des contrôles d'exploitation. A intervalles réguliers, il convient de consigner par écrit dans le rapport d'exploitation les données relevées sur l'installation. Il s'agit-là d'un instrument d'une grande utilité en vue de la vérification du coefficient de performance (COP) et qui peut servir de base pour les travaux de maintenance. Le principal critère d'appréciation pour le contrôle des résultats d'une pompe à chaleur est le coefficient de performance annuel (COPAn) et le rendement annuel pour pompe à chaleur et chauffage d'appoint. L'examen de ces critères n'est pos-

sible que s'il existe des données de mesure correspondantes sur la consommation d'énergie de la pompe à chaleur et des appareils auxiliaires ainsi que l'énergie de chauffage fournie.

10.3

Maintenance

Généralités

Pour qu'une pompe à chaleur fonctionne en toute sécurité et sans dysfonctionnement, il est nécessaire de procéder périodiquement à des opérations de maintenance. Celles-ci peuvent être réalisées dans le cadre:

- d'un contrat de maintenance ou
- du prolongement de la garantie (avec les prestations de service correspondantes)

Le personnel qui procédera à la maintenance des pièces de l'installation, au cours de laquelle on peut entrer en contact avec le fluide réfrigérant, doit être muni d'un «Permis pour l'utilisation de fluides frigorigènes».

Livret d'entretien

La tenue d'un livret d'entretien est obligatoire pour tous les appareils et installations contenant plus de 3 kg de fluide réfrigérant, quel qu'en soit le type.

Contrôle d'étanchéité

Un contrôle d'étanchéité régulier doit être effectué sur tous les appareils et

installations contenant plus de 3 kg de fluide réfrigérant stable dans l'air ou appauvrissant la couche d'ozone (voir également la directive «Installations et appareils stationnaires contenant des fluides réfrigérants, livret d'entretien, contrôle d'étanchéité, déclaration obligatoire»). Des délais plus longs s'appliquent aux installations compactes scellées.

l'installation est souvent réglée dans un état opérationnel et quelques réglages (p. ex., courbe de chauffe) sont effectués uniquement d'après les valeurs empiriques. L'optimisation de l'exploitation permet de réaliser des économies et de protéger l'environnement.

Catalogue de mesures: Voir «Principes de base pour l'exploitation optimale des installations complexes». Mesures par domaine/N° 4 – Pompes à chaleur.

10.4 Optimisation d'exploitation

Après la réception, il faut continuer de surveiller l'installation. Une installation qui est exploitée de manière optimale ne connaît en principe pas de dysfonctionnements et consomme donc moins d'énergie. Lors de la mise en service,

10.5 Dysfonctionnement et réparation

Il convient d'éviter de manière appropriée le dysfonctionnement des pompes à chaleur. Les principales causes de dysfonctionnement: voir figure 10.1.

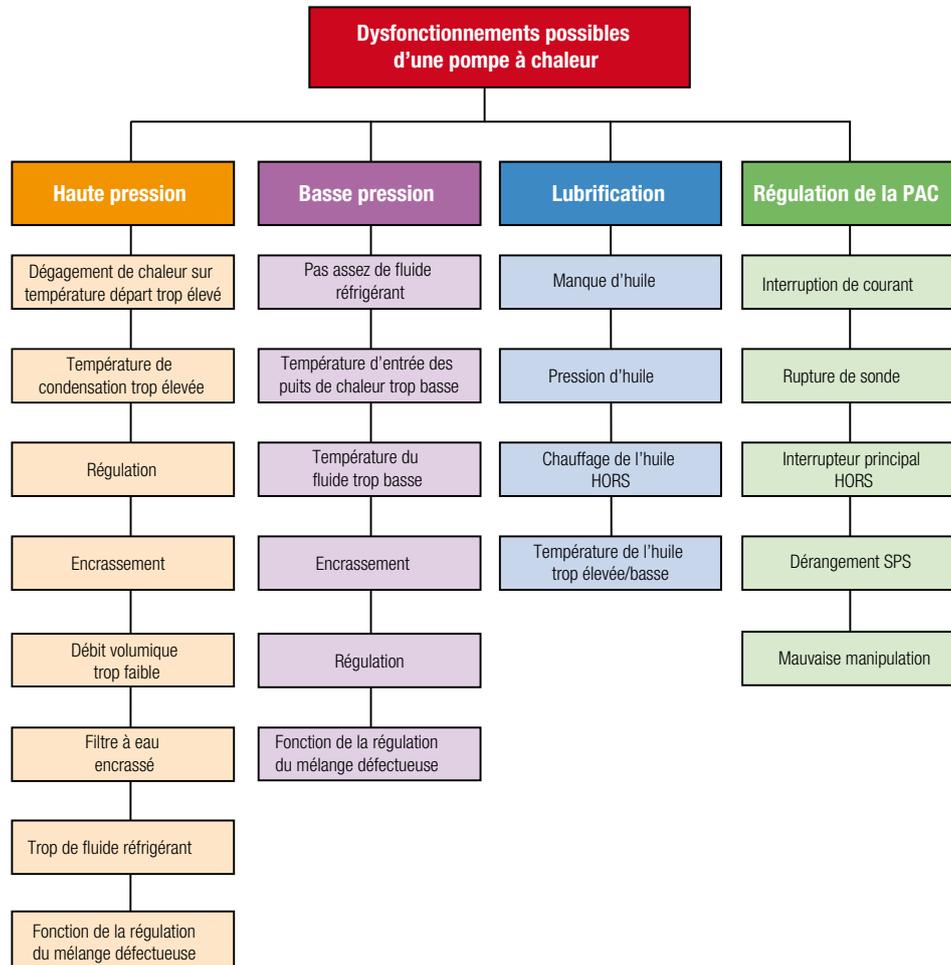


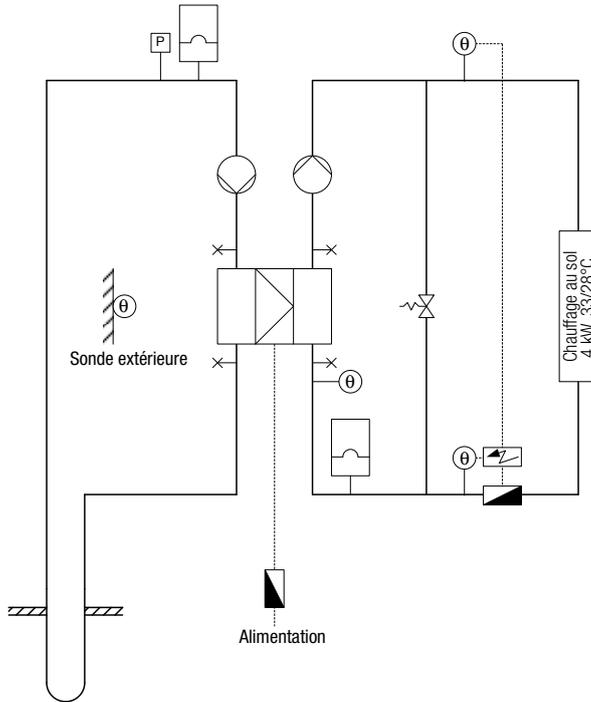
Figure 10.1: Dysfonctionnements et réparation des pannes sur les installations de pompes à chaleur

11.

Exemples concrets

11.1 Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques (maison individuelle)	68	11.6 Installation de pompe à chaleur air-eau combinée avec une chaudière à bûches	73
11.2 Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques (immeubles de bureaux)	69	11.7 Installation de pompe à chaleur bivalente exploitant la chaleur des eaux usées	74
11.3 Installation de pompe à chaleur air-eau	70	11.8 Exploitation de la chaleur rejetée pour le chauffage de l'eau sanitaire	75
11.4 Installation de pompe à chaleur à partir de la nappe phréatique	71	11.9 Production de chaleur et de froid	76
11.5 Exploitation de la chaleur des eaux usées pour le chauffage de l'eau sanitaire	72	11.10 Pompe à chaleur compacte destinée à la production de chaleur et de froid	77
		11.11 Pompe à chaleur compacte	78

11.1: Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques



Objet: Maison individuelle

Choix du système: La maison individuelle est chauffée au moyen d'une installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques. La chaleur est dégagée par un chauffage au sol. Le bâtiment est également équipé d'une aération contrôlée.

Éléments importants

- L'emplacement du forage et l'accès à celui-ci
- Le dimensionnement des sondes géothermiques

Calcul du TEWI

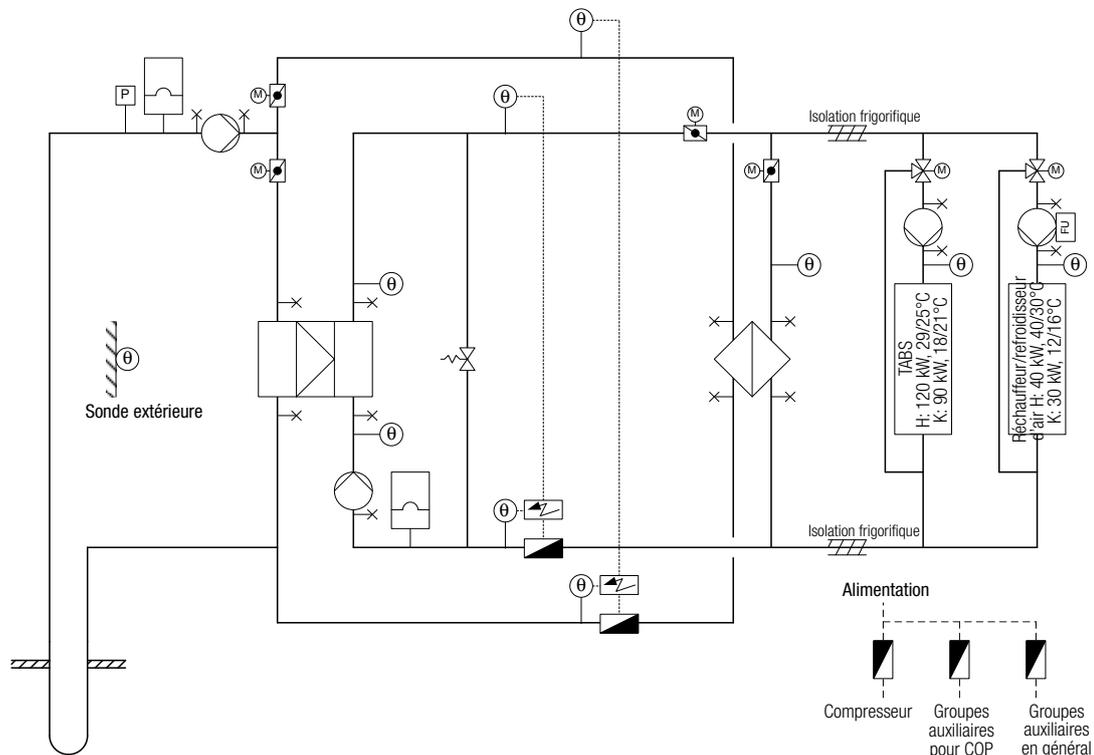
Pompe à chaleur saumure-eau, puissance nominale: 5,90 kW (B0/W35), fluide frigorigène: R-410a:

- | | |
|---|---|
| ■ PRG: 1720 équivalent CO ₂ /kg _{KM} | ■ Masse de remplissage de l'installation: 1,7 kg _{KM} |
| ■ Fuite par année: 0,05 kg _{KM} /a (systèmes hermétiques 2 % à 3 %, systèmes solubles 4 % à 6 % de la quantité de remplissage) | ■ Degré de récupération: 0,8 (pour l'ensemble du processus de recyclage) |
| ■ Durée d'exploitation de l'installation: 20 ans | ■ Besoins en énergie: 2340 kWh _{el} (1,3 kW x 1800 h/a) |
| | ■ Emission spécifique en CO ₂ : 0,15 équivalent CO ₂ /kWh _{el} |

$$\text{TEWI} = (1720 \times 0,05 \times 20) + (1720 \times 1,7 \times (1,0 - 0,8)) + (20 \times 2340 \times 0,15) = 9\,325 \text{ équivalent CO}_2$$

Le TEWI pourrait être réduit considérablement si les pompes à chaleur étaient alimentées avec du courant écologique provenant à 100 % d'énergies renouvelables.

11.2: Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques



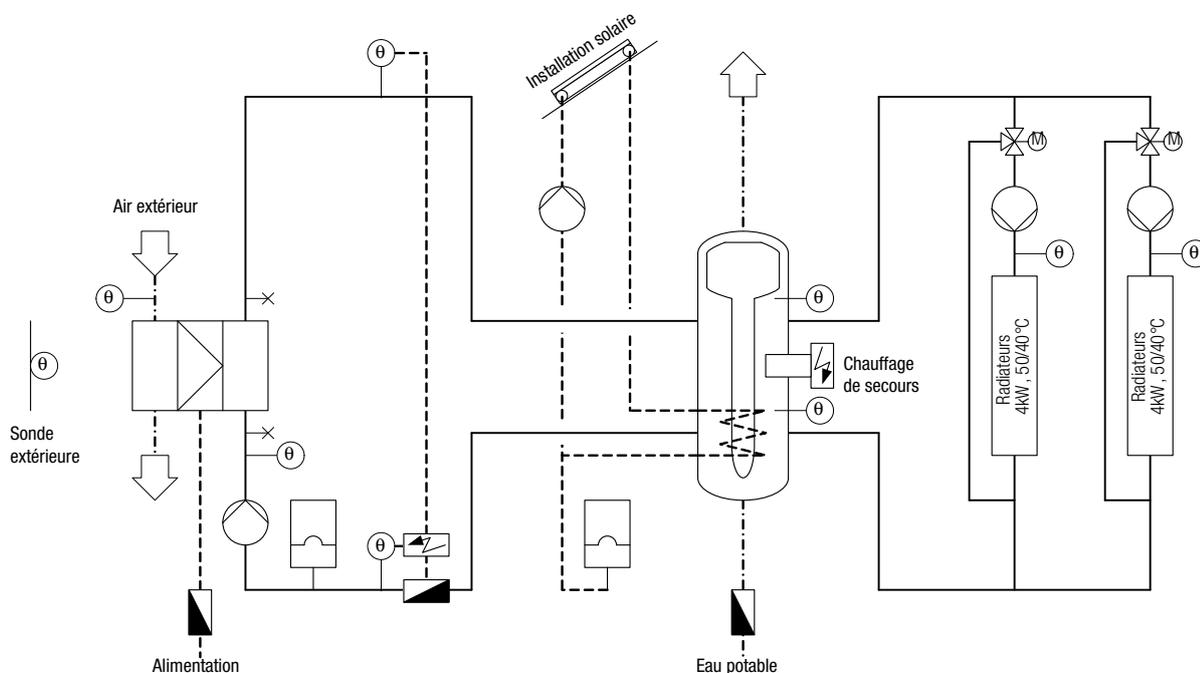
Objet: Bâtiment administratif

Choix du système Les besoins en énergie thermique sont couverts par une installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques. La chaleur est dégagée par un système à éléments thermoactifs. Le même système sert également à refroidir l'immeuble. Le refroidissement de l'immeuble se fait par les sondes géothermiques en mode «free cooling».

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Enregistrement séparé de la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement
- Dimensionnement des refroidisseurs et réchauffeurs d'air
- Isolation étanche à la vapeur du réseau de froid afin d'éviter l'eau de condensation
- Accès au site de forage et emplacement de celui-ci
- Dimensionnement des sondes géothermiques en fonction des besoins de refroidissement ou du chauffage
- Utilisation de vannes thermostatiques pour le chauffage et le refroidissement

11.3: Installation de pompe à chaleur air-eau



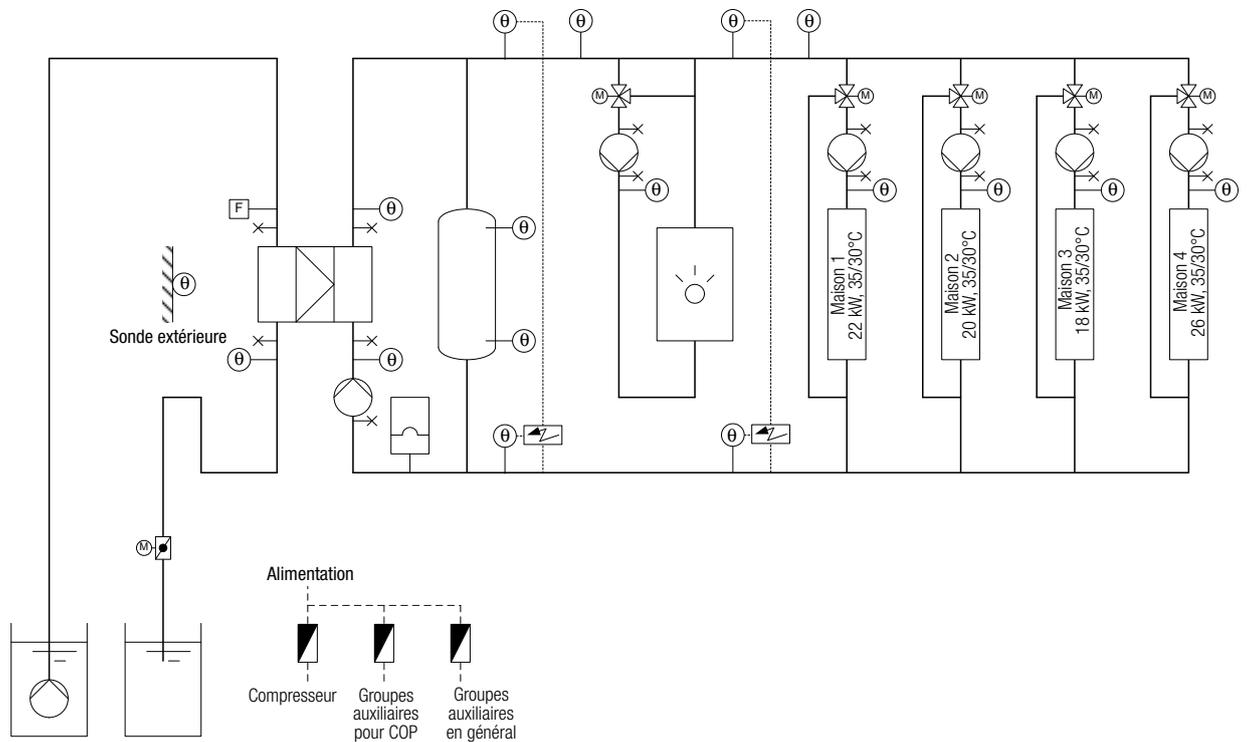
Objet: Maison jumelée

Choix du système: La maison jumelée est chauffée au moyen d'une installation de pompe à chaleur air-eau combinée à une installation solaire. L'énergie de chauffage produite par la pompe à chaleur est délivrée au système de distribution de chaleur via un accumulateur d'énergie. L'eau sanitaire est chauffée dans l'accumulateur d'énergie. Chaque maison individuelle a son propre groupe de chauffage. La chaleur est dégagée par des radiateurs.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Problématique du système d'eau chaude sanitaire et de circulation en fonction d'une bonne stratification de l'accumulateur
- Quantité d'eau chaude sanitaire limitée à court terme
- Modèle de décompte de chauffage

11.4: Installation de pompe à chaleur à partir de la nappe phréatique



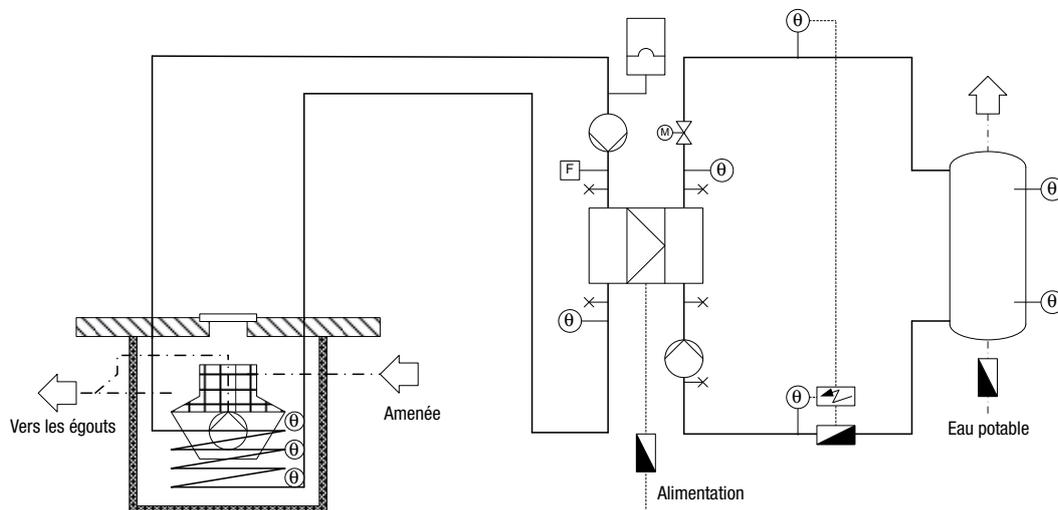
Objet: Lotissement

Choix du système: Le lotissement est composé de 4 immeubles locatifs de 6 appartements chacun. Le terrain se trouvant au-dessus d'une nappe phréatique, la production de chaleur doit idéalement se faire au moyen d'une pompe à chaleur eau-eau. Une chaudière à mazout est employée pour couvrir les besoins de pointe (mode parallèle bivalent). La chaleur est dégagée par des chauffages au sol.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Temps nécessaire pour la procédure d'autorisation
- Qualité de l'eau phréatique en ce qui concerne les paramètres physiques et chimiques ainsi que les matières solides etc.
- Dimensionnement du circulateur de l'eau phréatique

11.5: Exploitation de la chaleur des eaux usées pour le chauffage de l'eau sanitaire



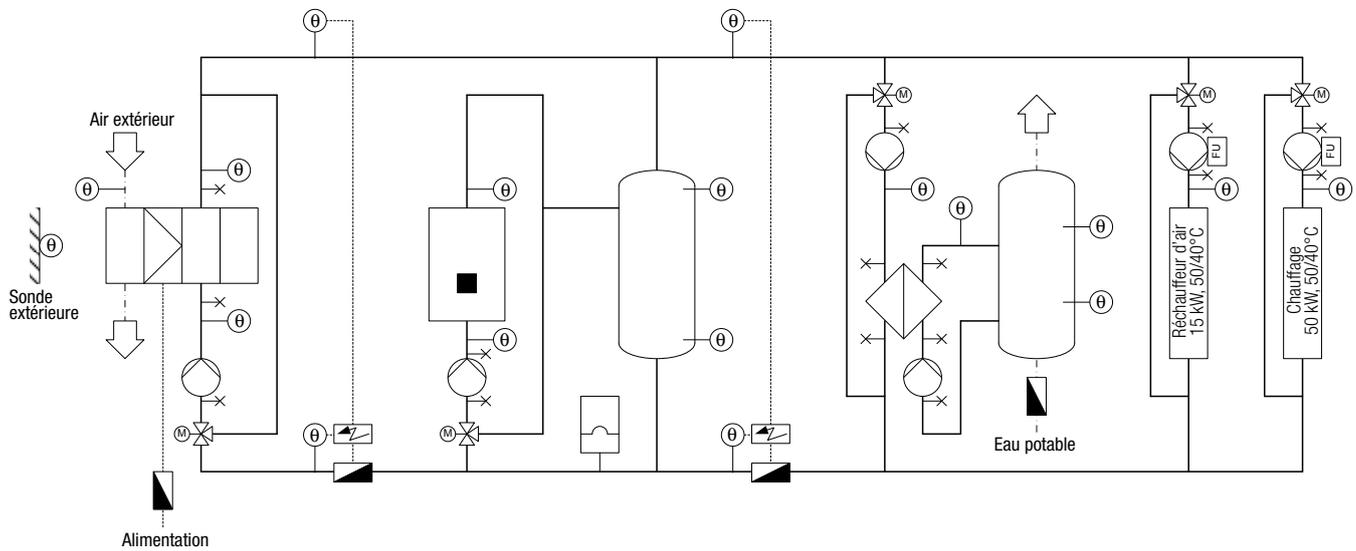
Objet: Maison de repos

Choix du système: Le chauffage primaire de l'eau sanitaire se fait par une installation de pompes à chaleur et d'un système récupérant la chaleur des eaux usées. Le puits des eaux usées comprenant l'échangeur de chaleur et les pompes se trouve en sous-sol à l'extérieur du bâtiment.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Quantités d'eaux usées et qualité des eaux
- Répartition temporelle de l'accumulation d'eaux usées et besoins en eau chaude potable
- Sécurité antigel de tous les éléments de l'installation situés à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment
- Accessibilité pour les travaux de nettoyage et d'entretien

11.6: Installation de pompe à chaleur air-eau combinée avec une chaudière à bûches



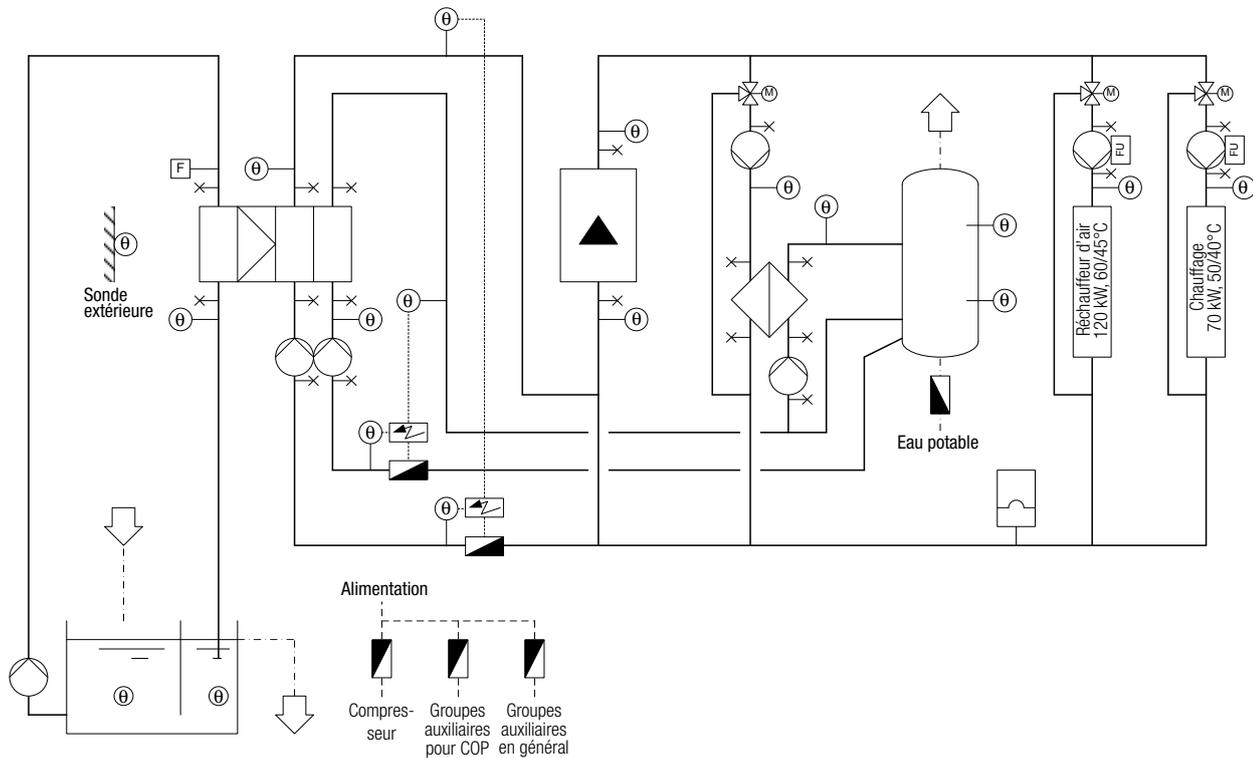
Objet: Ecole d'agriculture

Choix du système: L'école d'agriculture doit être chauffée par des énergies renouvelables. L'école possédant un terrain boisé, il était logique de couvrir ses besoins en énergie thermique par une chaudière à bûches. Pour l'entre-saison, une pompe à chaleur air-eau en mode bivalent alternatif est prévue.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Séparation hydraulique du générateur de chaleur et de l'accumulateur
- Emissions sonores et autres

11.7: Installation de pompe à chaleur bivalente exploitant la chaleur des eaux usées



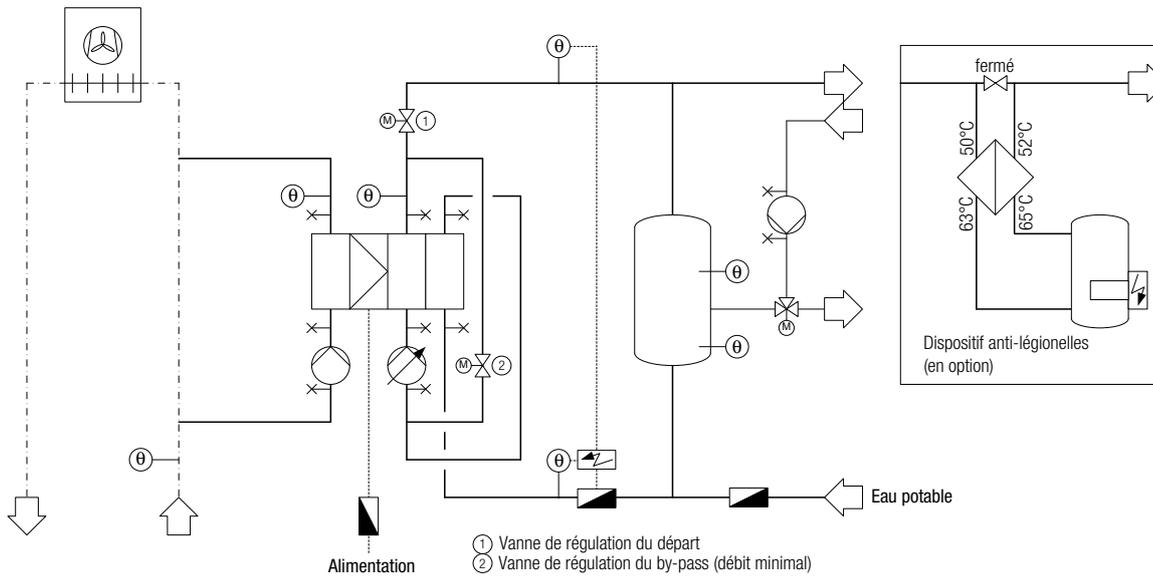
Objet: Teinturerie, ancienne bâtisse

Choix du système: La source de chaleur est l'eau usée provenant du processus industriel (pas de matières fécales). Ces eaux usées n'étant disponibles que pendant les heures de production, une solution bivalente mettant en œuvre une chaudière à gaz a dû être trouvée. Un sous-refroidisseur permet d'augmenter le coefficient de performance de la pompe à chaleur.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Qualité des eaux usées en ce qui concerne les paramètres physiques et chimiques et éventuellement les matières solides
- Répartition temporelle de l'accumulation d'eaux usées et besoins en eau chaude potable
- Dimension et répartition des bassins de récupération des eaux usées
- Accessibilité pour les travaux de nettoyage et d'entretien
- Choix du type de chaudière pour le circuit hydraulique prévu avec débit variable pour la chaudière

11.8: Exploitation de la chaleur rejetée pour le chauffage de l'eau sanitaire



Objet: Supermarché

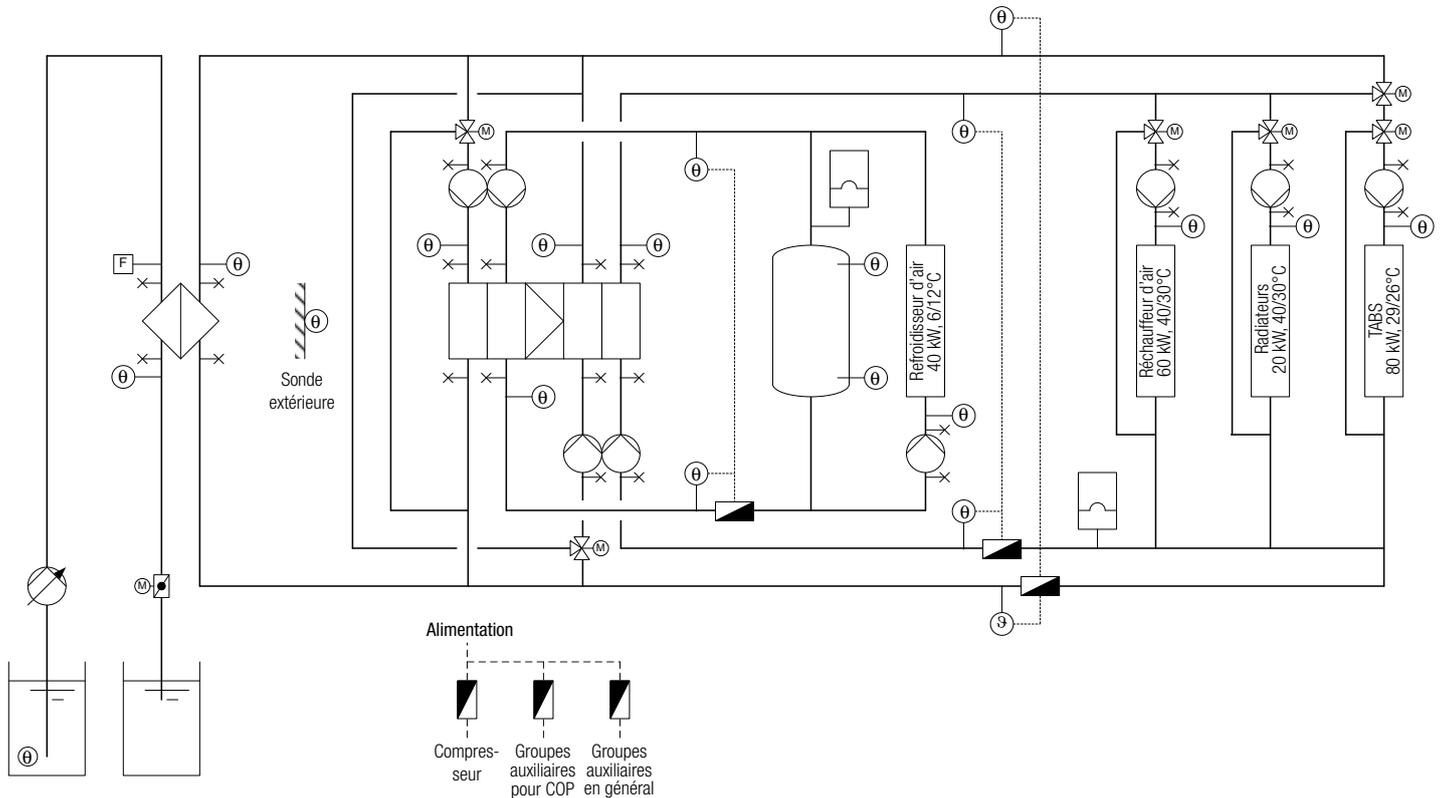
Choix du système: L'eau sanitaire est chauffée au moyen de la chaleur rejetée par les installations frigorifiques du supermarché. La température d'entrée dans le sous-refroidisseur peut être maintenue basse au moyen d'une régulation du débit par le condenseur et le sous-refroidisseur de la pompe à chaleur.

En option, il est possible d'installer un dispositif thermique de désinfection (prévention de la légionellose) dans la conduite d'eau chaude sanitaire ou dans la conduite de circulation. Cet équipement désinfecte l'eau chaude sanitaire en permanence.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Débit volumique minimal nécessaire pour l'eau chaude potable par l'intermédiaire du condenseur et le sous-refroidisseur de la pompe à chaleur
- Température variable côté source de chaleur

11.9: Production de chaleur et de froid



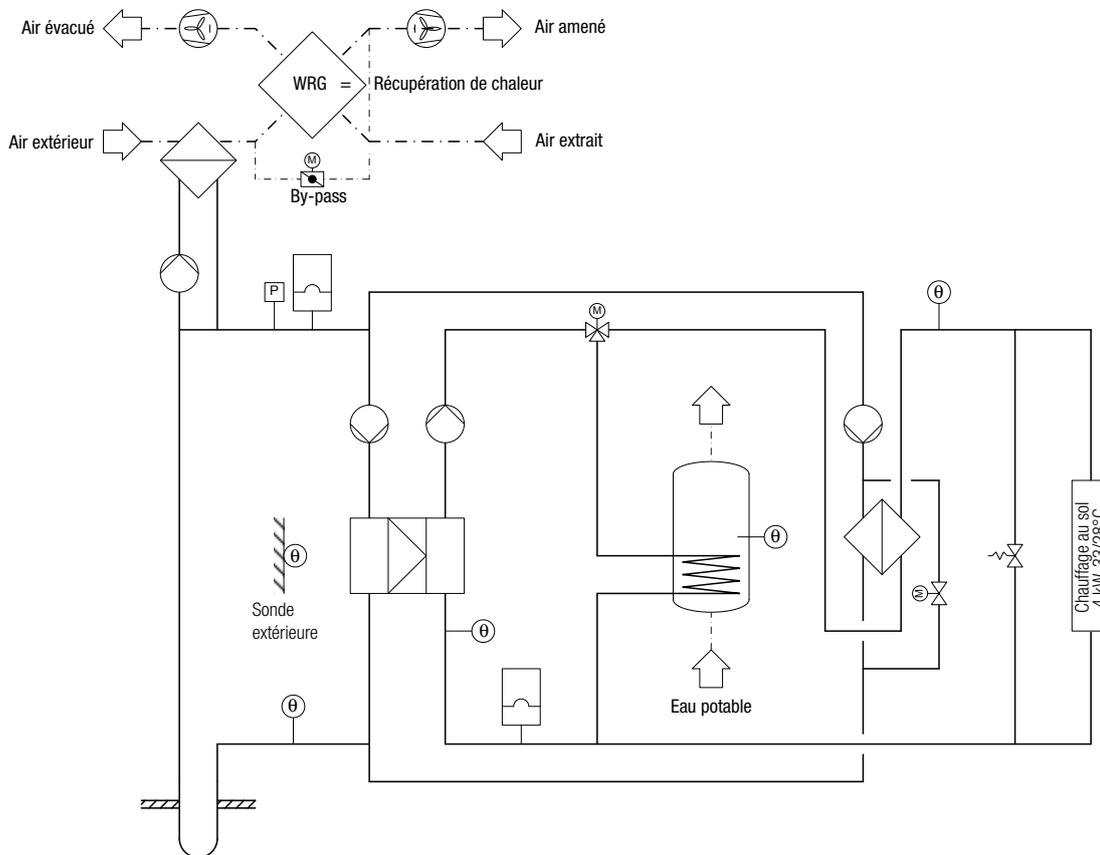
Objet: Musée

Choix du système: La nappe phréatique sert de source de chaleur et de point de rejet de la chaleur excédentaire pour une installation de production de chaleur et de froid. L'installation dispose de plusieurs modes de fonctionnement parallèles (froid technique, froid pour le conditionnement d'air via un système à éléments thermoactifs, chaleur technique, chaleur de chauffage).

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Temps nécessaire pour la procédure d'autorisation
- Qualité des eaux usées en ce qui concerne les paramètres physiques et chimiques et éventuellement les matières solides etc.
- Dimensionnement du circulateur des eaux phréatiques
- Tous les modes d'exploitation possibles du circuit hydraulique
- Interfaces

11.10: Pompe à chaleur compacte destinée à la production de chaleur et de froid



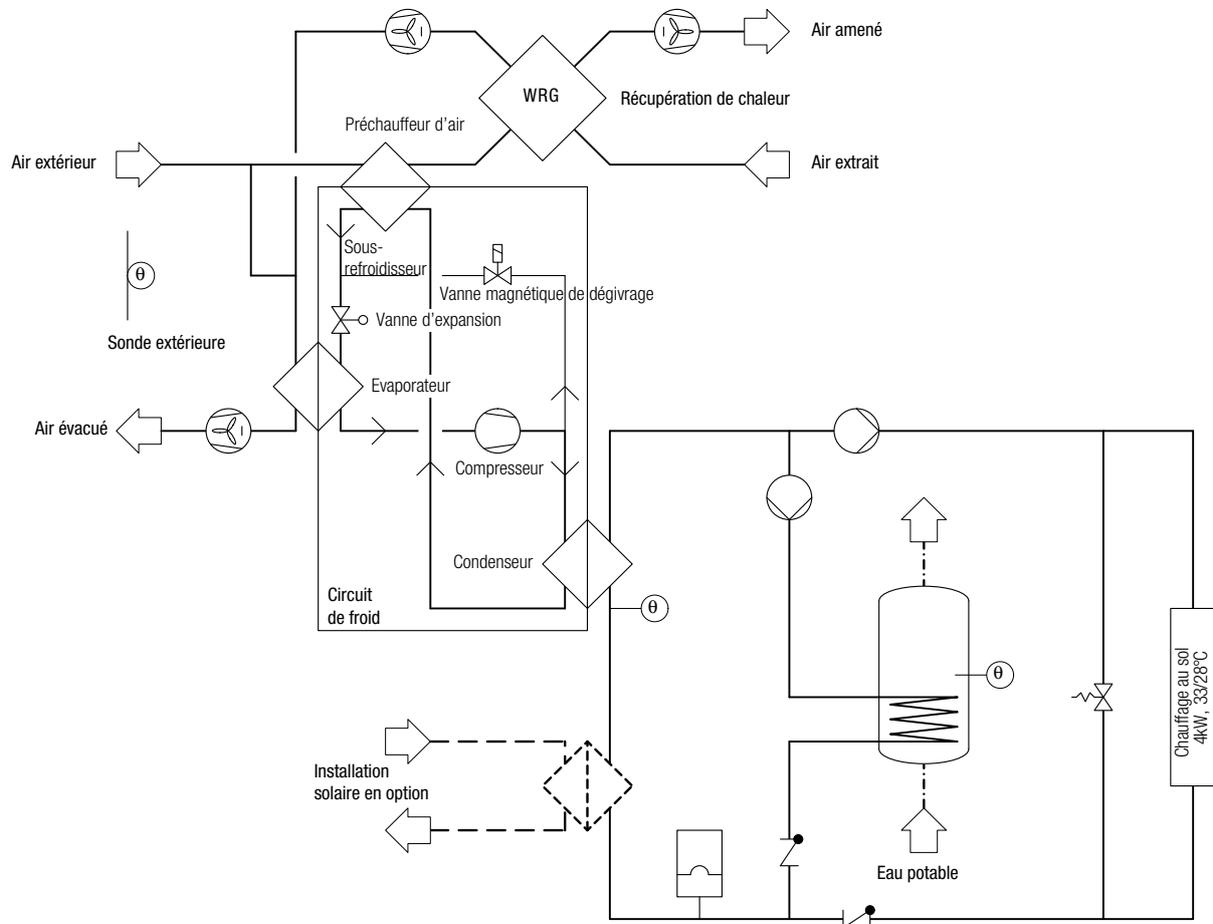
Objet: Immeuble d'habitation

Choix du système: Une pompe à chaleur compacte, raccordée à des sondes géothermiques et équipée d'un système de récupération de la chaleur de l'air, alimente le chauffage au sol et de l'eau sanitaire. Le refroidissement de l'immeuble par «free cooling» peut se faire via l'installation de ventilation et le chauffage au sol. La chaleur est alors évacuée par les sondes géothermiques. L'intégration d'une installation solaire est possible également.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Températures admissibles du système en mode refroidissement pour éviter tout problème de condensation
- Données du fabricant de l'appareil compact
- Accès au site de forage et emplacement de celui-ci

11.11: Pompe à chaleur compacte



Objet: Immeuble d'habitation

Choix du système: Une pompe à chaleur compacte, raccordée à des sondes géothermiques et équipée d'un système de récupération de la chaleur de l'air, alimente le chauffage au sol et de l'eau sanitaire. Plusieurs modes de fonctionnement peuvent agir sur la température de l'air, en faisant varier le débit volumique continu de l'air en fonction des besoins. L'intégration d'une installation solaire est possible également.

Il convient de veiller en particulier aux points suivants:

- Données du fabricant de l'appareil compact
- Le débit volumique de l'air extérieur/air évacué par la pompe à chaleur doit être adaptée à la puissance de la pompe à chaleur afin de pouvoir si possible renoncer à un chauffage d'appoint.

Auteurs

Peter Kunz, Kunz-Beratungen, Dietlikon (coordination globale)

Prof. Dr. Thomas Afjei, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz

Prof. Werner Betschart, Haute-Ecole de Lucerne – Technique et architecture, Horw

Peter Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg

Rolf Löhner, Scheco AG, Winterthur

Andreas Müller, Müller + Pletscher AG, Winterthur

Vladimir Prochaska, Haute-Ecole de Lucerne – Technique et architecture, Horw

Accompagnement du projet

Fabrice Rognon, responsable du domaine Pompes à chaleur, CCF, froid, Office fédéral de l'énergie OFEN

Daniel Brunner, responsable du domaine Formation et perfectionnement, Office fédéral de l'énergie OFEN



**Groupement promotionnel suisse
pour les pompes à chaleur GSP**

**Centre d'information pour les
pompes à chaleur**

Rue Saint-Roch 36

1400 Yverdon-les-Bains

Tél. 024 426 02 11

Fax 024 426 02 12

E-Mail: info@pac.ch

www.pac.ch



Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, adresse postale: CH-3003 Berne
Téléphone 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00
contact@bfe.admin.ch, www.bfe.admin.ch