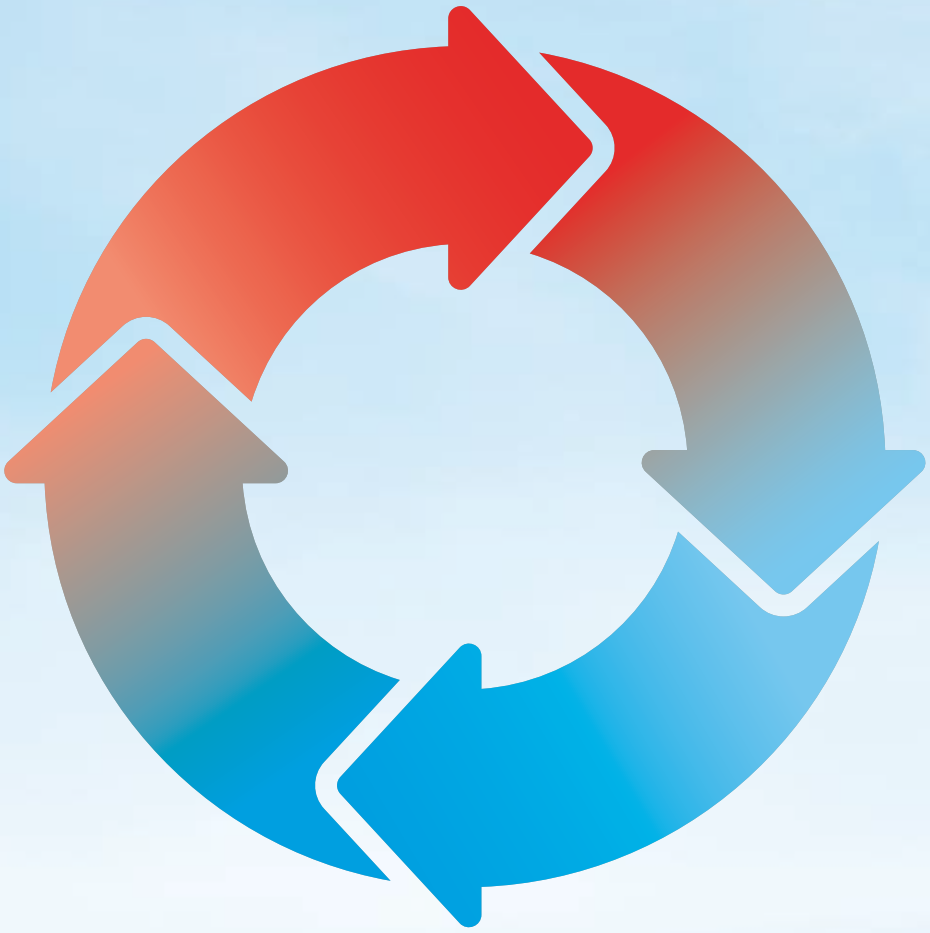
Genkinger (éd.) I Alimpic I Messmer I Zgraggen I Zogg

Pompes à chaleur

Planification, optimisation, fonctionnement, entretien



faktor
Architektur Technik Energie

EnDK
Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie

suisseénergie

Impressum

Pompes à chaleur – Planification, optimisation, fonctionnement et entretien

Autrices et auteurs
Édition revue 2026: Andreas Genkinger (coordination générale), Zoran Alimpic, Christoph Messmer, Lorenzo Zgraggen, David Zogg
Édition 2018: Ralf Dott (coordination générale), Thomas Afjei, Zoran Alimpic, Andreas Genkinger, Peter Hubacher, Rita Kobler

Révision et mise en page: Faktor Verlag, Zurich; René Mosbacher, Christine Sidler

Traduction: Teconia GmbH, Herisau

Lectorat spécialisé: Philippe Ranc, GSP, Bex

Image de couverture: Pixabay/Faktor Verlag

Cette publication fait partie de la collection de livres spécifiques «Construction durable et rénovation». Elle a été financée par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN/SuisseEnergie) et par la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK).

Commande: à télécharger (gratuitement) sous www.suisseenergie.ch ou disponible au format livre auprès de Faktor Verlag: www.faktor.ch

6e édition entièrement revue et complétée, septembre 2026
ISBN: 978-3-907944-04-2

Avec le soutien de

GSP

SWKI

suissetec

ProKlima

brenet

SVK ASF ATF
Schweizerischer Verband für Kältetechnik

GebäudeKlima Schweiz
ImmoClimat Suisse
ImmoClima Svizzera

SVLW
Schweizerischer Verein Luft- und Wasserhygiene

Contenu

1. Bases 5
1.1 Cycle de fonctionnement 5
1.2 Limites du système et valeurs caractéristiques 8
1.3 Normes 10

2. Composants 17
2.1 Compresseur 17
2.2 Échangeur de chaleur 19
2.3 Détendeur 21
2.4 Dispositifs de sécurité 22
2.5 Autres composants 22
2.6 Dispositifs de dégivrage 23
2.7 Types de pompes à chaleur 24
2.8 Processus alternatifs 24

3. Fluide frigorigène 25
3.1 Propriétés 25
3.2 Désignation des fluides frigorigènes selon l'ASHRAE 27
3.3 Choix du fluide frigorigène 27
3.4 Fluides frigorigènes naturels 29
3.5 Quantité de remplissage maximale en fluide frigorigène selon la norme SN EN 378-1 33
3.6 Effet de serre et indice TEWI 34
3.7 Life Cycle Climate Performance (LCCP) 35
3.8 Autres incidences environnementales: PFAS et TFA 36
3.9 Conditions-cadres légales et évolutions 36
3.10 Informations complémentaires 40

4. Sources de chaleur 41
4.1 Air extérieur 41
4.2 Géothermie 43
4.3 Eau souterraine 49
4.4 Rejets thermiques 54
4.5 Refroidissement de bâtiments 55
4.6 Sources 64

5. Dégagement de chaleur 65
5.1 Chauffage à eau chaude 66
5.2 Installations de climatisation 69
5.3 Production d'eau chaude 70
5.4 Autres systèmes 73

6. Intégration dans les installations techniques 75
6.1 Principes 75
6.2 Modes d'exploitation 76
6.3 Système hydraulique 78
6.4 Circulateurs 83

7. Intégration dans des systèmes photovoltaïques 85
7.1 Introduction 85
7.2 Intégration de la pompe à chaleur 88
7.3 Modes de fonctionnement des pompes à chaleur 89
7.4 Interfaces 92
7.5 Perspectives 92
7.6 Sources 95

8. Acoustique et protection contre le bruit 97
8.1 Valeurs limites légales 97
8.2 Réduction du bruit 98

9. Planification 103
9.1 Label de qualité GSP/EHPA 103
9.2 PAC Système-Module (PAC-SM) 103
9.3 PACesti 104
9.4 Aides à l'étude du projet 104
9.5 Approvisionnement en électricité 105
9.6 Centrale de chauffe 106
9.7 Rentabilité 107
9.8 Contrôle des résultats 109

10. Mise en service 115
10.1 Phase avant la mise en service 116
10.2 Préparation de la mise en service 116
10.3 Source de chaleur et dégagement de chaleur 117
10.4 Mise en service de la pompe à chaleur 117
10.5 Protocole de mise en service 118
10.6 Instructions de service 118
10.7 Protocole de réception 119
10.8 Documentation relative à l'installation 121

11. Exploitation 123
11.1 Exploitation et contrôle des résultats 123
11.2 Surveillance de l'exploitation 123
11.3 Maintenance 123
11.4 Optimisation de l'exploitation 124
11.5 Dysfonctionnement et réparation des pannes 127

12. Installations de grande puissance 129
12.1 Généralités 129
12.2 Intégration 130
12.3 Bâtiments individuels 131
12.4 Lotissements 135
12.5 Systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité 136
12.6 Applications industrielles 136
12.7 Planification et mise en œuvre 137

13. Exemples concrets 141
13.1 Installations de petite taille 141
13.2 Installations plus complexes 146

14. Annexe 155
14.1 Auteurs 155
14.2 Abréviations 156
14.3 Index 158

Avant-propos

Une évolution considérable

Depuis la première édition de ce livre en 2008, les pompes à chaleur ont connu de nombreux changements. À l'heure actuelle, elles sont pour ainsi dire devenues une sorte de couteau suisse lorsqu'il s'agit de chauffer et de refroidir les bâtiments et de les approvisionner en eau chaude sans porter atteinte au climat. Désormais, les bâtiments neufs et même les bâtiments existants sont généralement équipés de pompes à chaleur en raison des améliorations techniques qui ont été apportées. En outre, les possibilités offertes par les pompes à chaleur en matière d'utilisation des rejets thermiques (notamment ceux provenant des centres de calcul ou de données qui sortent de terre de toutes parts) sont encore loin d'être épuisées.

Si l'objectif consiste à exploiter pleinement les avantages des pompes à chaleur en termes de protection du climat, d'efficacité énergétique et de coûts de fonctionnement, elles doivent être alors planifiées, installées et exploitées de manière optimale et dans les règles de l'art. Le fondement de toutes bonnes solutions repose généralement sur une coopération interdisciplinaire de tous les acteurs impliqués dans la planification et l'exécution. Parmi ces derniers figurent notamment les architectes, les technicien·ne·s et les spécialistes en installation. Les connaissances et le savoir-faire emmagasinés permettront à une telle équipe de proposer aux investisseurs, aux propriétaires et aux gestionnaires de biens immobiliers les meilleures solutions possible en matière de fourniture de chaleur et de froid.

L'objectif de ce livre est toujours le même: transmettre à un large public professionnel un savoir solide à propos des pompes à chaleur, et ce, dans un langage compréhensible. Avec sa nouvelle édition, cet ouvrage de référence éprouvé est désormais disponible dans sa version actualisée. Il comporte deux chapitres supplémentaires. Le premier est consacré aux pompes à chaleur combinées avec des installations photovoltaïques et le second aborde, quant à lui, la planification de grandes installations. Les chapitres portant sur les fluides frigorigènes, sur l'étiquette-énergie, sur la directive européenne relative à l'écoconception et sur le refroidissement des bâtiments ont fait l'objet d'une révision approfondie. Par ailleurs, les exemples pratiques ont été complétés. Bien entendu, l'ensemble des contenus ont été adaptés aux exigences légales, aux normes et aux directives actuellement en vigueur.

Chapitre 1

Bases

1.1 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 frigorigène s'évapore dans la partie froide lors de l'absorption d'une quantité aussi grande que possible de chaleur d'évaporation ($\dot{Q}_{KM}$). Par compression, ce fluide se réchauffe puis se liquéfie à nouveau, processus dégageant de la chaleur de condensation ($\dot{Q}_{PAC}$). Il est ensuite détendu à la pression d'évaporation au travers d'un détendeur. Toutes les installations fonctionnant selon ce principe utilisent la dépendance entre la température d'évaporation resp. de condensation et la pression du fluide frigorigène. Une telle installation peut être représentée de façon simplifiée comme dans l'Illustration 1.1.

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).
- Puissance P ou $\dot{Q}$ est le quotient du travail effectué ou de la chaleur transformée par unité de temps, mesurés en watts (W).
- Entropie s: L'entropie est une mesure de l'irréversibilité et ainsi de la dégradation de l'énergie dans un processus.

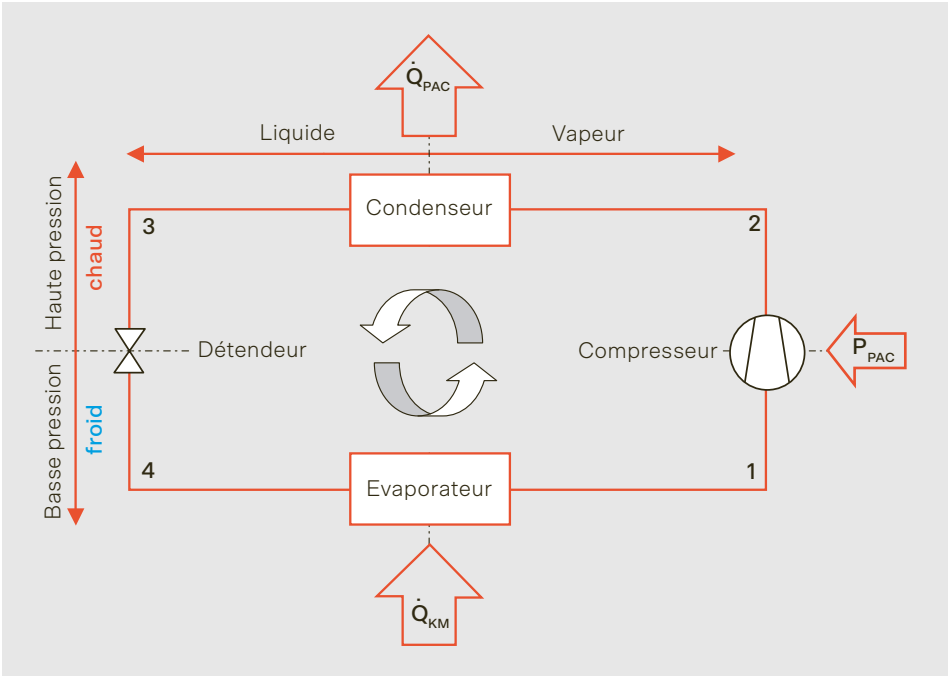


Illustration 1.1: Principe du procédé de compression de vapeur froide.

Cycle de carnot

Le rendement idéal est donné par le cycle de Carnot; il s'agit d'un cycle n'ayant aucune perte. Dans le cycle de Carnot, on obtient le coefficient $\varepsilon_{C,PAC}$ pour le chauffage (pompe à chaleur, rendement: chaleur) comme suit:

$$\varepsilon_{C,PAC} = \left(\frac{\dot{Q}_{C,PAC}}{P_{C,C}}\right)_{Ideal} = \frac{T_C}{T_C - T_0}$$

Le cas du refroidissement (machine frigorifique, rendement: froid) est toujours moins efficient car dans ce cas la chaleur de compression ne peut pas être utilisée:

$$\varepsilon_{C,KM} = \left(\frac{\dot{Q}_{C,FF}}{P_{C,C}}\right)_{Ideal} = \frac{T_0}{T_C - T_0} = \varepsilon_{C,PAC} - 1$$

$\dot{Q}_{C,PAC}$ Puissance thermique fournie en kW

$\dot{Q}_{C,FF}$ Puissance frigorifique prélevée en kW

$P_{C,C}$ Puissance mécanique absorbée du compresseur en kW

T_0 Température d'évaporation en K

T_C Température de condensation en K

$\varepsilon_{C,PAC}$ ($\varepsilon_{C,FF}$) est une limite physique, les pompes à chaleur réelles (machines frigorifiques) ne peuvent jamais atteindre cette valeur. Le rapport entre la caractéristique de puissance réelle et la caractéristique de puissance de Carnot est appelé efficacité η (exergétique):

$$\eta_{PAC} = \frac{\varepsilon_{PAC}}{\varepsilon_{C,PAC}} \text{ resp. } \eta_{FF} = \frac{\varepsilon_{FF}}{\varepsilon_{C,FF}}$$

Le niveau de qualité se situe typiquement dans le domaine entre 0,4 et 0,6.

Diagramme log p,h

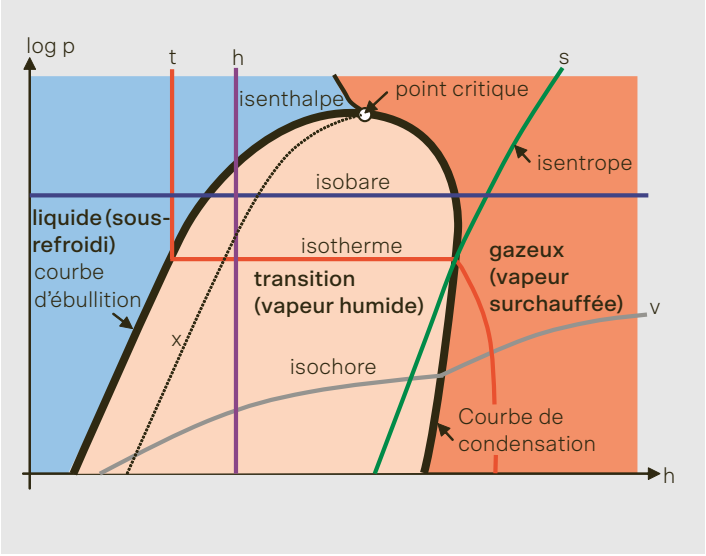
Un diagramme log p,h permet de représenter clairement le cycle de fonctionnement et montre le rapport entre les grandeurs d'état du fluide frigorigène. Les états du fluide frigorigène peuvent également être déduits du tableau des pressions du fluide en question. l'Illustration 1.2 présente le déroulement des grandeurs d'état lors de processus particulier. L'Illustration 1.3 présente le processus cyclique exempt de pertes d'une pompe à chaleur dans un diagramme log p,h, et l'Illustration 1.4 présente le processus réel (avec pertes). Cette représentation se réfère au comportement interne de la machine par rapport aux changements d'état du fluide frigorigène (indice «R» dans les formules).

Le processus cyclique (courbe bleue) de l'Illustration 1.3, resp. Illustration 1.4 se déroule principalement en quatre phases:

- 1–2: Compression
- 2–3: Condensation
- 3–4: Détente
- 4–1: Évaporation

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

Légende:
log p: pression en bar, échelle logarithmique
s: entropie spécifique en KJ/K/kg
h: enthalpie spécifique en KJ/kg
v: volume spécifique en m^3/kg
t: température en °C
x: part de vapeur en %



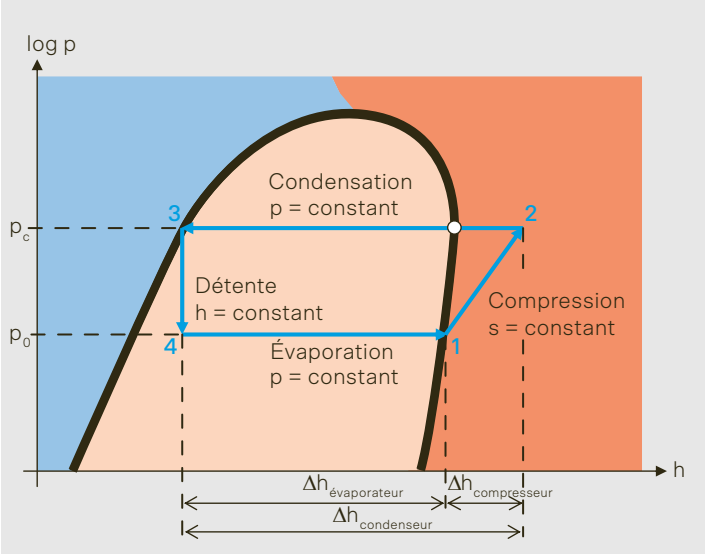


Illustration 1.3: Le processus sans perte dans le diagramme log p,h.

$$\varepsilon_{R,PAC} = \frac{\dot{Q}_{R,PAC}}{P_{R,V}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$\dot{Q}_{R,PAC}$ Puissance thermique fournie par la vapeur du fluide frigorigène en kW

$P_{R,V}$ Puissance transférée à la vapeur du fluide frigorigène en kW

h_1 Enthalpie du fluide frigorigène à l'entrée du compresseur en kJ/kg

h_2 Enthalpie du fluide frigorigène à la sortie du compresseur en kJ/kg

h_3 Enthalpie du fluide frigorigène à la sortie du condenseur en kJ/kg

Dans l'Illustration 1.4 du processus réel, on relèvera quelques points:
– Dans certains types de compresseur, afin d'éviter la pénétration de gouttelettes de fluide frigorigène dans le compresseur et son endommagement, il est nécessaire de surchauffer le gaz aspiré (points 1'–1).
– Une partie de la chaleur peut être prélevée à un niveau de température plus élevé, donc par la température de condensation, au moyen d'un désurchauffeur de gaz chaud (points 2–2').
Exemple: Une pompe à chaleur est activée à 45 °C côté condenseur. Il est toutefois possible, selon le fluide frigorigène et le niveau de charge, de prélever env. 5 à 15 % de cette puissance de chauffe au moyen d'un désurchauffeur à un niveau de température supérieur à 60 °C. Cela permet de réchauffer l'eau chaude sanitaire.

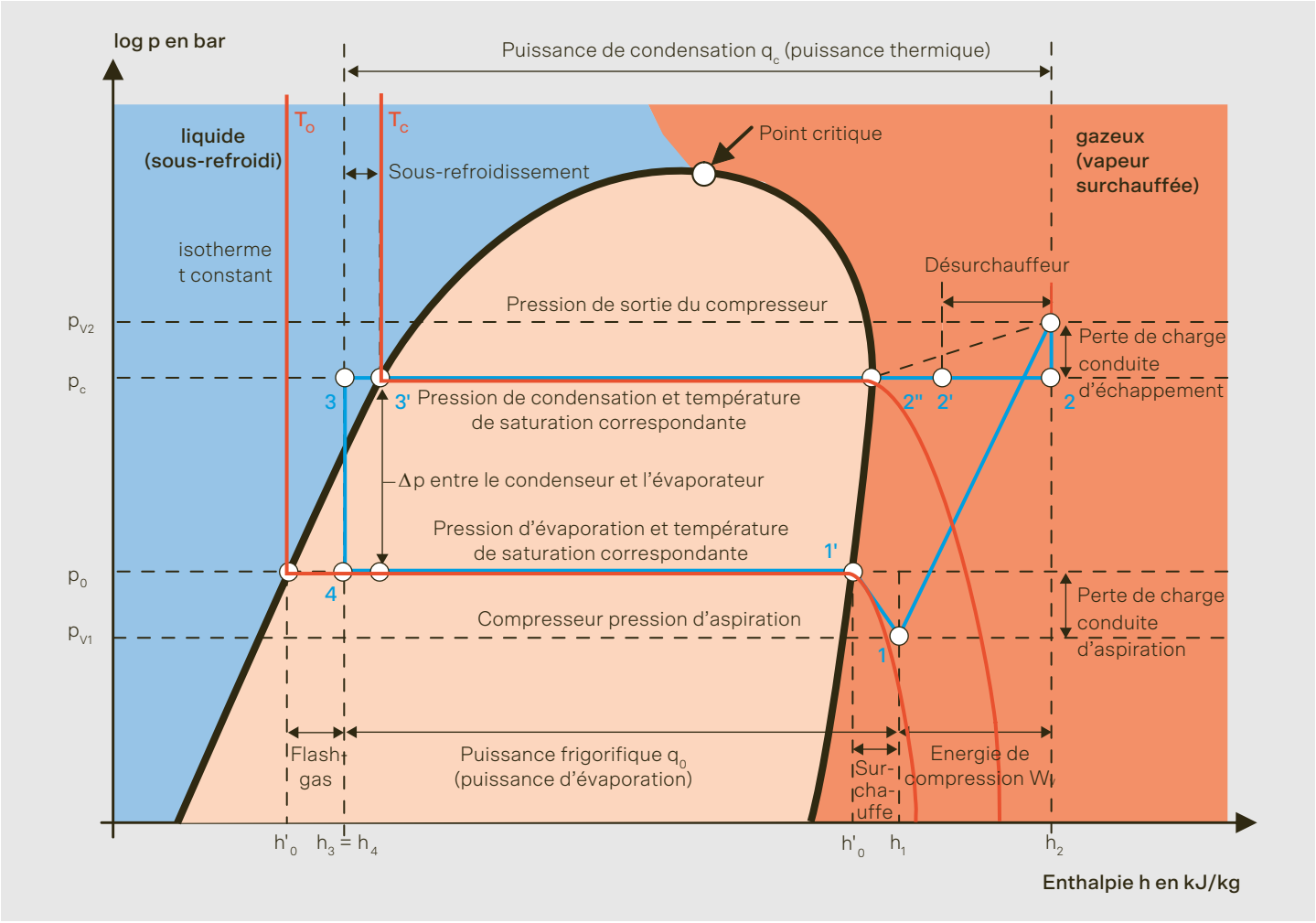


Illustration 1.4: Le diagramme log p,h pour le processus frigorifique d'un fluide frigorigène.

Remarque: Ce procédé n'est utile que pour les pompes à chaleur de plus grande taille.
L'Illustration 1.5 montre les rapports de température des fluides externes (p. ex. eau de chauffage) sur une pompe à chaleur. Les températures moyennes du fluide dans le condenseur/évaporateur sont toujours plus basses/plus élevées que celles du fluide frigorigène (T_c /T_o). Ces différences de température sont dépendantes du type de construction de l'échangeur de chaleur et du fluide externe. La température d'entrée de l'évaporateur et la température de sortie du condenseur sont caractérisées spécialement: ces températures sont mentionnées dans les données des fiches techniques conjointement avec les coefficients de performance pour ce point de fonctionnement.

1.2 Limites du système et valeurs caractéristiques

Les indicateurs d'efficacité les plus utilisés au quotidien pour les installations de pompe à chaleur sont le coefficient de performance COP (Coefficient of Performance) et le coefficient de performance annuel (COPA). Le COP est clairement défini d'après la norme européenne EN 14511 et correspond au

Illustration 1.5: Températures et flux d'énergie dans une pompe à chaleur. (Source: FHNW INEB)

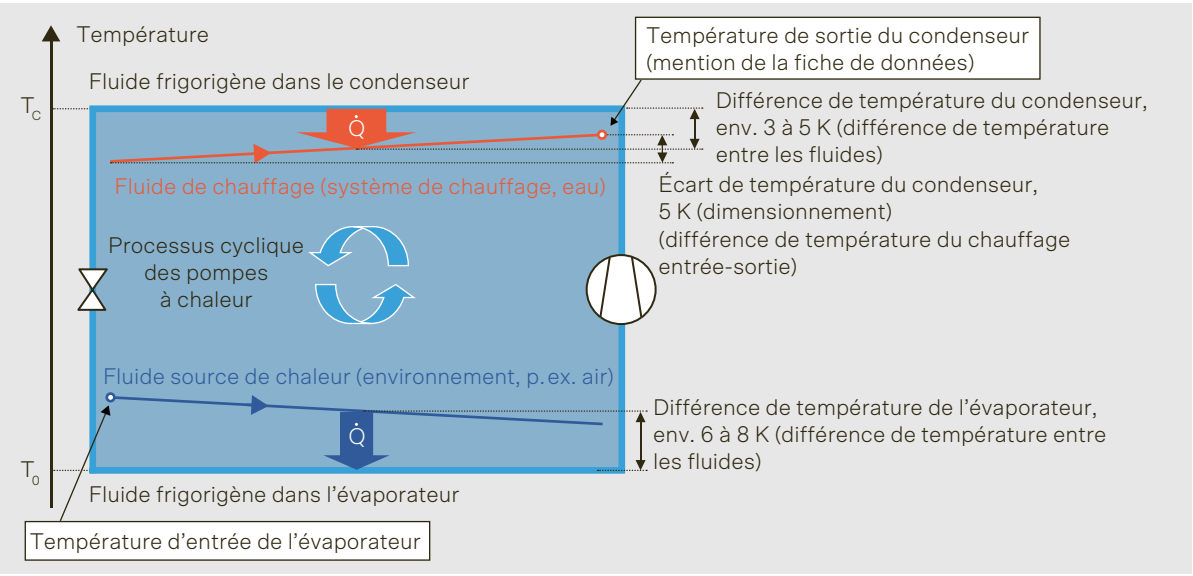


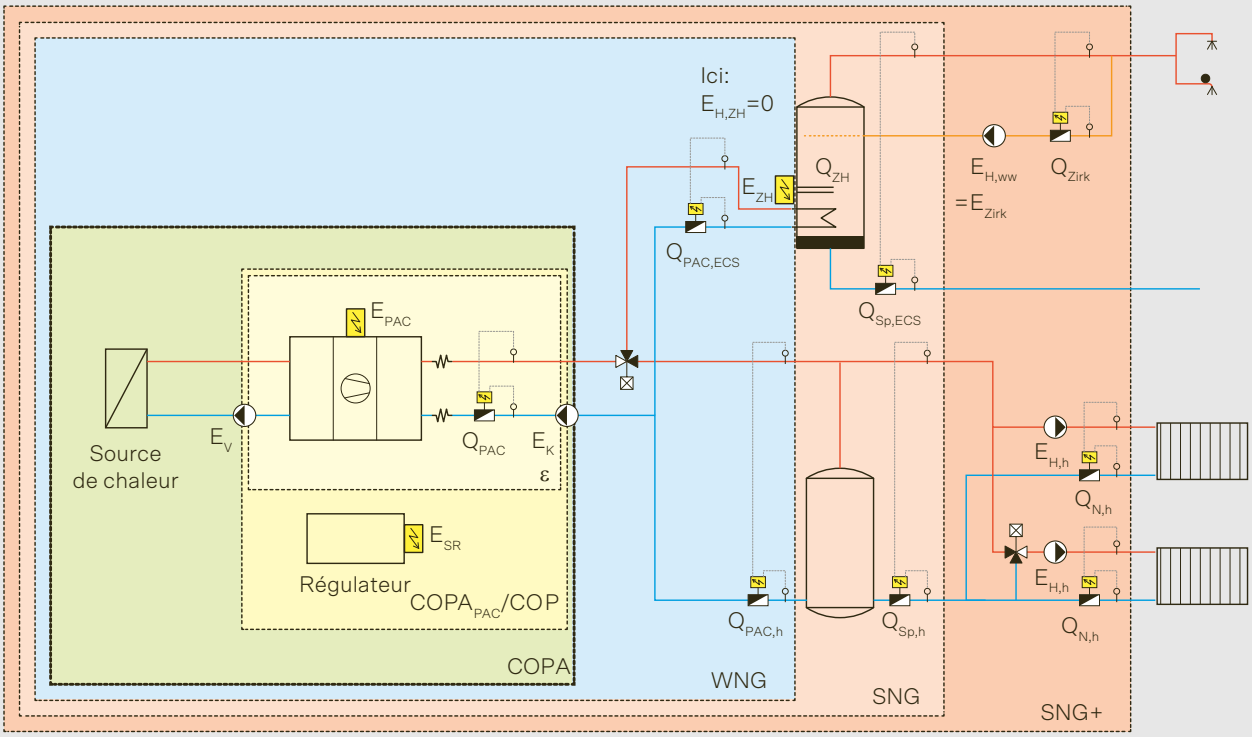
Illustration 1.6: Explication des symboles de l'Illustration 1.7.

Puissances (valeurs momentanées ou valeurs moyennes sur une brève période)

- $\dot{Q}_{PAC}$ Puissance de chauffe de la PAC
- P_{PAC} Puissance absorbée par le compresseur de la pompe à chaleur
- (P_V) Part de puissance pour compenser la perte de charge de l'évaporateur
- (P_K) Part de puissance pour pallier la perte de charge du condenseur
- P_{SR} Puissance absorbée par la commande/régulation à l'intérieur de la pompe à chaleur
- P_A Puissance absorbée moyenne par le dispositif de dégivrage

Énergies (valeurs annuelles)

- Q_{PAC} = $Q_{PAC,h}$ + $Q_{PAC,ww}$ chaleur produite par la pompe à chaleur
- Q_{ZH} Chaleur produite par le chauffage d'appoint
- Q_{Sp} = $Q_{Sp,h}$ + $Q_{Sp,ww}$ chaleur utile dégagée par les accumulateurs
- Q_N = $Q_{N,h}$ + $Q_{N,ww}$ chaleur disponible chez l'utilisateur
- E_{PAC} Consommation d'énergie du compresseur de la pompe à chaleur
- (E_V) Consommation d'énergie de la pompe d'évaporation/ventilateur (part PAC interne)
- (E_K) Consommation d'énergie de la pompe du condenseur (part PAC interne)
- E_V Consommation d'énergie de la pompe de l'évaporateur/ventilateur (globale)
- E_K Consommation d'énergie de la pompe du condenseur (globale)
- E_{SR} Consommation d'énergie de la commande et de la régulation
- E_A Consommation d'énergie du dispositif de dégivrage
- E_C Consommation d'énergie du chauffage de carter
- E_{ZH} Consommation d'énergie du chauffage d'appoint
- $E_{H,ZH}$ Consommation d'énergie auxiliaire pour le chauffage d'appoint (p. ex. circulateurs)
- $E_{H,h}$ Consommation d'énergie auxiliaire pour la distribution de chaleur chauffage (p. ex. circulateurs)
- $E_{H,ww}$ Consommation d'énergie auxiliaire pour la production d'eau chaude sanitaire (p. ex. circulation)



Lié à la puissance

Indice de performance (ε)

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{P_{PAC}}$$

Coefficient de performance (COP)

$$COP = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{P_{PAC} + (P_V) + (P_K) + P_{SR} + P_A}$$

Lié à l'énergie

Coefficient de performance annuel de la PAC

$$COPA_{PAC} = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + (E_V) + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Coefficient de performance annuel COPA

$$COPA = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_V + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Rendement du générateur de chaleur (WNG)

$$WNG = \frac{Q_{PAC} + [Q_{ZH}]}{E_{PAC} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + [E_{ZH} + E_{H,ZH}]}$$

[...]: Y c. chauffage d'appoint

Rendement du système (SNG)

$$SNG = \frac{Q_{Sp}}{E_{PAC} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH}}$$

Rendement du système Plus (SNG+)

$$SNG+ = \frac{Q_N}{E_{PAC} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH} + E_{H,h} + E_{H,ww}}$$

Illustration 1.7: Limites du système et valeurs caractéristiques des pompes à chaleur.

rapport entre la puissance de sortie et la puissance absorbée en un point de fonctionnement fixe. Le coefficient de performance annuel (COPA) correspond sans équivoque au taux d'utilisation (c.-à-d. le rapport entre l'émission d'énergie et la consommation d'énergie sur une année), mais est toutefois souvent utilisé avec des limites de système peu claires dans la pratique. Les notions plus différenciées indiquées dans l'Illustration 1.7 ont fait leurs preuves et se distinguent des indications du chapitre 1.1 dans le sens où elles se réfèrent aux flux d'énergie externes (mesurables).
On devrait en outre toujours différencier les valeurs se référant à l'exploitation du chauffage, à la production d'eau chaude ou à la production d'eau chaude et de chauffage combinée. Le cas échéant (p. ex. chauffage de piscine), d'autres consommateurs doivent également être pris en compte.

Coefficient de performance saisonnier et efficacité énergétique pour le chauffage des locaux
Avec l'introduction des exigences d'écodesign et de l'étiquette énergie pour les appareils de chauffage, la définition dudit «coefficient de performance saisonnier» SCOP, conformément à la norme EN 14825, est devenue extrêmement importante. Outre des exigences légales, divers labels de qualité se basent aujourd'hui sur cet indicateur. Le SCOP décrit l'efficience d'un appareil de chauffage pour une charge théorique donnée, fixement prédéterminée (définie sous forme de courbe de chauffage). L'appareil n'est pas seulement évalué en un certain point de fonctionnement donné (COP). Le COP «saisonnier» (SCOP) représente à l'inverse une efficience qui prend en considération et pondère tous les points de fonctionnement (en charge partielle) apparaissant au cours de l'année. Le climat de Strasbourg (F), qui coïncide à peu près avec la situation sur le Plateau suisse, sert de base climatique. En variante, deux autres situations climatiques («plus froid»/Helsinki et «plus chaud»/Athènes) peuvent être utilisées. Au moyen des limites de système fixées ci-dessus, le SCOP est la valeur qui reflète le plus fidèlement le taux d'utilisation du générateur de chaleur. Sur la base du SCOP, la norme EN 14825 définit une efficacité énergétique primaire η_s, qui suppose un facteur de conversion ou facteur d'énergie primaire pour l'électricité de 2,5 (version 2018). Lors de la conversion du SCOP en η_s de petites corrections pour la régulation et les pompes de circulation sont également prises en compte. Pour le mode de production d'eau chaude comme pour le mode de refroidissement, on détermine des valeurs caractéristiques comparables. On n'entrera ici pas davantage dans les détails; ces notions sont toutefois résumées dans le Tableau 1.1.

1.3 Normes

Les contrôles de produits et la planification des installation reposent essentiellement sur des normes, qui sont mondiales (ISO), européennes (EN) ou nationales (en Suisse: SN, resp. SIA) correspondant à l'état actuel de la technique. Ces normes sont souvent basées sur des labels de qualité et des exigences légales. Les normes fréquemment citées dans le domaine des pompes à chaleur sont compilées dans le Tableau 1.2.

Remarque: En plus des normes d'essai et des normes de planification, il faut également tenir compte des directives et des cahiers techniques relatifs à la sécurité des appareils, dont notamment
- Directive sur les appareils de pression (2014/68/EU, auparavant 97/23/EG)
- Directive sur les machines (2006/42/EG)
- Directives de la Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail (CFST): EKAS 1825 (liquides inflammables), EKAS 6507 (ammoniac), EKAS 6516 (équipements sous pression), CFST 6517 (gaz liquéfiés)

Indice	Description	Description	Norme
Mode chauffage/mode eau chaude			
COP	Coefficient of Performance	Efficience à un point de fonctionnement déterminé	EN 14511/ EN 16417
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance	Efficience saisonnière compte tenu des conditions de fonctionnement modifiées	EN 14825/ EN 16147
η_s / η_{wh}	Efficience de l'énergie primaire	Efficacité énergétique primaire, basée sur SCOP	EN 14825/ EN 16417
Mode de refroidissement			
EER	Energy Efficency Ratio	Analogie avec le COP pour le refroidissement	EN 14511
SEER	Seasonal Energy Efficency Ratio	Analogie avec le SCOP pour le refroidissement	EN 14825
ESEER	European Seasonal Energy Efficency Ratio	Comparable au SEER, mais autre répartition de la charge et sans pertes en veille. Pas de notion d'ecodesign.	Eurovent/ SIA 384/4

Tableau 1.1: Désignations de l'efficience dans le cadre des exigences d'ecodesign sur les appareils de chauffage, d'eau chaude et de refroidissement.

Norme	Description	Application
Normes		
SN EN 14511	Norme générale pour les pompes à chaleur	Labels de qualité, données des fiches techniques
SN EN 14825	Norme pour PAC. Détermine le procédé pour le calcul SCOP et SEER	Étiquette-énergie, labels de qualité, données des fiches techniques, autorisation de commercialisation
SN EN 16147	Norme pour chauffe-eau pompe à chaleur	Étiquette-énergie, labels de qualité, données des fiches techniques, autorisation de commercialisation
Normes de planification		
SIA 181	Protection contre le bruit dans le bâtiment	Base pour la protection contre le bruit dans les installations PAC
SN EN 378	Exigences techniques de sécurité et exigences environnementales	Utilisation de fluides frigorigènes
SIA 384/1	Bases d'installations de chauffage. Y c. PAC	Calcul de la puissance des générateurs de chaleur
SIA 384/3	Procédé pour déterminer les besoins finaux en énergie des installations de chauffage. Y c. PAC	Estimation simplifiée (outil de typologie) et programmes de calcul détaillés (PACesti)
SIA 384/4	Installations de refroidissement dans les bâtiments	–
SIA 384/6	Sondes géothermiques	Bases de planification, exécution et fonctionnement de sondes géothermiques.
SIA 384/7	Utilisation de la chaleur des eaux souterraines	Complément à la norme SIA 384/6
SIA 384/201	Calcul de la puissance de chauffage normalisée des locaux et des bâtiments	Avec SIA 384/1 Base de dimensionnement pour la puissance du générateur de chaleur
SIA 385/2	Dimensionnement des installations d'eau potable	Conjointement avec SIA 384/1 Base de dimensionnement des générateurs de chaleur.
SIA MB 2048	Optimisation énergétique de l'exploitation	–

Tableau 1.2: Principales normes sélectionnées en relation avec les PAC. La version actuelle est toujours importante.

– ATEX, directives sur la protection contre les explosions
– SUVA fiche 2153 «Prévention des explosions»

Conditions-cadres légales
Lors de la planification, de l'installation et de la mise en service d'installations de pompes à chaleur, il faut impérativement respecter les exigences légales. Celles-ci sont réglées en partie au plan national, cantonal ou communal. Le Tableau 1.3 présente un aperçu non exhaustif. Dans les tous les cas, les interlocuteurs sont les autorités locales (commune et canton).

Ecodesign et etiquette-energie
Depuis 2015, l'Union européenne impose des exigences au regard de l'«écoconception» des appareils de chauffage. Simultanément, l'obligation relative à l'étiquette énergie de ces équipements d'une puissance thermique jusqu'à 70 kW a été mise en place. La Suisse a repris cette obligation une année plus tard dans l'Ordonnance sur l'énergie (depuis 2018 Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique OEEE). Les deux exigences se basent sur l'efficacité énergétique primaire η_s. L'étiquette énergie est en outre un instrument qui doit permettre de comparer entre elles différentes technologies. Ainsi, les chaudières, les installations couplage chaleur-force (CCF), les chauffages électriques directs et les pompes à chaleur sont évalués à l'aide d'une seule et même étiquette (Illustration 1.8). Les pompes à chaleur sont toutefois subdivisées plus précisément en «pompes à chaleur» (température de départ de dimensionnement 55 °C) et «pompes à chaleur basse température» (température de départ de dimensionnement 35 °C) – des exigences énergétiques plus élevées sont aussi imposées à ces dernières en raison d'une meilleure efficacité due à des paramètres physiques

Base	Contenu	Remarque
Ordonnance sur l'énergie (OEne). Depuis 2018: Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE)	Autorisation de commercialisation et obligation d'information pour la mise en circulation de PAC	Comprend l'obligation de déclaration des données des produits et obligation d'étiquetage énergétique
Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB)	Exigences aux immissions du bruit extérieur	–
Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPec)	Exigences à l'utilisation de PAC, en particulier à des températures départ admissibles pour système de chauffage, dimensionnement (corps de chauffe él.)	Le MoPec est un modèle mis en œuvre par le canton.
Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim)	Manipulation et utilisation de fluides frigorigènes	Obligation de déclarer pour les installations avec plus de 3 kg de fluides frigorigènes stables dans l'air
Loi sur la protection des eaux (LEaux), Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)	p. ex. pour l'utilisation des eaux souterraines ou la chaleur terrestre	Réglementation cantonale
Procédure d'autorisation de construire	p. ex. pour l'utilisation des eaux souterraines ou la chaleur terrestre	Communal/cantonal
Directive de protection incendie (AEAI 24-15)	Exigences de protection incendie pour les installations thermiques	Cantonal
Cahier des charges pour PAC Système-Module (PAC-SM)	Exigences concernant les composants, le système hydraulique, la régulation et l'optimisation opérationnelle de l'ensemble des installations	Base d'aide financière pour les petites installations de pompe à chaleur avec une puissance de chauffage allant jusqu'à 15 kW

Tableau 1.3: Sélection de lois, d'ordonnances et de directives pour les installations PAC.

(Tableau 1.4). Elles se situent toutefois toujours dans les classes d'efficacité les plus élevées. Néanmoins, l'évaluation est toujours liée à une charge définie, déterminée sous la forme d'une courbe de chauffage sous un climat moyen (Strasbourg/F; à peu près comparable au Plateau suisse). L'étiquette énergie évalue donc uniquement un appareil, et non son utilisation effective ou son intégration dans le système global.

Remarque: comme pour tous les générateurs de chaleur, les installateurs de pompes à chaleur d'une puissance de chauffe jusqu'à 70 kW doivent présenter une étiquette énergie. Celui-ci évalue toutefois uniquement l'appareil dans des conditions bien déterminées. Comme unique critère de sélection, l'étiquette énergie n'est ainsi pas tout à fait appropriée. Une pompe à chaleur air-eau évaluée A++ peut dans certaines conditions (p. ex. espace alpin) être moins appropriée qu'un appareil eau glycolée-eau évalué A+.

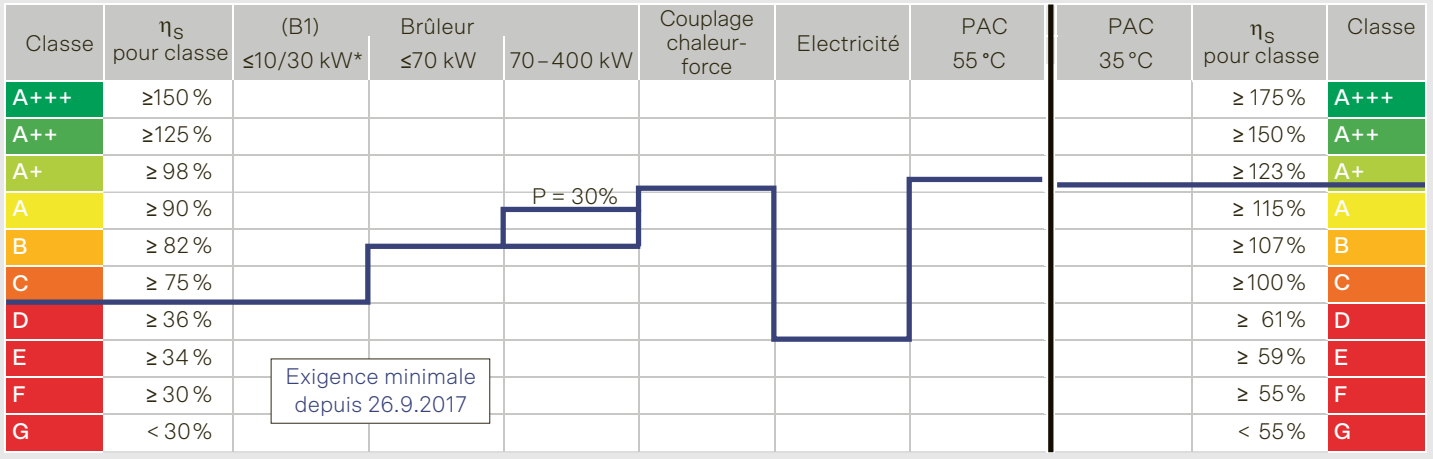
Tableau 1.4: Affectation à des classes et exigences énergétiques minimales pour PAC (SCOP pour appareils eau-air, état 2018). (Source: FHNW INEB)

	Dimensionnement température départ 55 °C		Dimensionnement température départ 35 °C	
	SCOP	η_s	SCOP	η_s
A+++	3,83	150 %	4,45	175 %
A++	3,20	125 %	3,83	150 %
A+	2,53	98 %	3,15	123 %
Exigence Ecodesign	2,83	110 %	3,20	125 %

Refonte: Écoconception et étiquette-énergie

Le règlement européen (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 vise à établir un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, EU-ERSP). De nouvelles exigences seront ensuite introduites pour la quasi-totalité des produits mis sur le marché au sein de l'UE. Ces exigences comprennent notamment un passeport numérique de produit qui contient des données, telles que les matériaux et leur origine ou les incidences environnementales tout au long du cycle de vie des produits. Cette mesure vise à encourager les entreprises à adopter un mode de fonctionnement économique plus durable et à accroître leur responsabilité sociale. Pour la branche, ce point s'accompagne de charges administratives supplémentaires. En outre, les fabricants et les exploitants sont exposés à des coûts supplémentaires entraînés par le test de conformité obligatoire à faire effectuer par des tiers et par l'autosurveillance.

Au moment où ce livre est parti à l'impression, la refonte des règlements européens (UE) 811/2013 et 812/2013 concernant l'étiquette-énergie et les règlements européens (UE) 814/2013 et 81572013 relatifs à l'écoconception se trouvait dans sa phase finale. Leurs ver-



*Type B1 Brûleur ≤ 10 kW / Type B11 Chauffe-eau combiné ≤ 30 kW

Illustration 1.8: Affectation aux classes et exigences minimales à l'efficacité énergétique primaire η_s de générateurs de chaleur. Pour les PAC basse température («PAC 35 °C»), une affectation aux classes séparée a été créée. (Source: Andreas Genkinger, FHNW INEB)

sions révisées seront probablement publiées au Journal officiel de l'Union européenne dans le courant de l'année 2026. Les exigences contenues dans ces textes devront être définitivement appliquées sur le marché environ deux ans après leur publication. Toutefois, certaines d'entre elles pourront être également introduites à une date ultérieure et, si nécessaire, certaines parties seront susceptibles de faire l'objet d'adaptations selon un calendrier défini.

Une modification essentielle des règlements révisés concerne notamment les exigences minimales concernant le SCOP (Illustration 1.9). La révision de ces documents vise principalement à pouvoir exploiter le parc immobilier sans émissions de CO_2 d'ici 2050. C'est également cet objectif que poursuivent d'autres réglementations complémentaires, telles que la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) et le système d'échange de quotas d'émission pour les bâtiments (Emissions Trading System, ETS2).

Répercussions sur la Suisse

Certes, la législation européenne ne revêt pas un caractère directement contraignant pour le marché suisse. Toutefois, il existe un accord passé entre la Suisse et l'Union européenne qui vise une reconnaissance mutuelle des évaluations de conformité (principe du Cassis de Dijon). En outre, certains points de la législation suisse renvoient directement à des textes de loi de l'UE. La portée des adaptations prévues pour la Suisse concernant ces modifications applicables à l'UE n'est pas encore définie à l'heure actuelle (2025).

Dans le cas des pompes à chaleur, les modifications suivantes contenues dans les règlementations européennes revêtent un caractère important pour la Suisse:

- baisse du facteur d'énergie primaire de l'électricité consommée en Europe
- la conception, le contenu informatif et l'échelonnement de l'étiquette-énergie
- la déclaration des niveaux de puissance acoustique à une charge partielle de 54 % au lieu de 35 %
- une température de la source de 5 °C pour pompes à chaleur eau glycolée/eau
- des exigences en matière de maintenabilité et de réparabilité
- une autosurveillance assurée par l'appareil
- des déclarations techniques modifiées concernant la puissance nominale

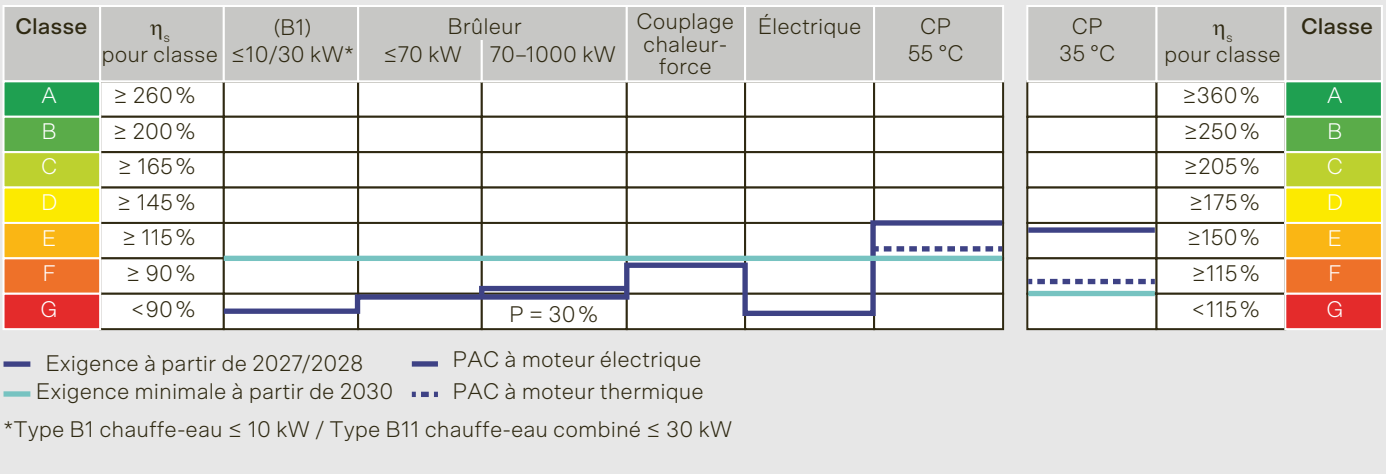


Illustration 1.9: Classification et exigences minimales en matière d'efficacité énergétique primaire ηs des générateurs de chaleur selon le projet de révision des ordonnances sur l'écoconception et l'étiquetage énergétique, état 2025. (Source: Andreas Genkinger, FHNW INEB)

Une autre modification va également concerner le marché suisse. Il s'agit du facteur d'énergie primaire pour l'électricité étant donné que l'évaluation énergétique d'une installation de production de chaleur dépend bel et bien de cette donnée. En raison de la modification du mix de production en Europe, le facteur d'énergie primaire est passé de 2,5 à 1,9. Par conséquent, l'efficacité énergétique primaire η_s des pompes à chaleur connaît une augmentation de 50 % environ (en valeur absolue). Qu'il s'agisse des exigences minimales définies par la directive sur l'écoconception ou bien de l'étiquette-énergie, plusieurs corrections sont prévues et elles viseront à éviter toute modification des exigences techniques. À la suite du rééchelonnement de l'étiquette-énergie, les pompes à chaleur seront plutôt réparties dans les classes C et B au lieu d'être classées A++ ou A+++ comme c'est le cas actuellement. D'une manière générale, il sera impossible de comparer les indications mentionnées sur l'étiquette-énergie sous sa forme connue jusqu'ici avec les informations qui figureront sur sa nouvelle version, et ce, qu'il s'agisse de l'énergie ou des émissions sonores.
L'exigence minimale concernant l'efficacité énergétique primaire sera probablement augmentée à au moins 115 % pour tous les générateurs de chaleur vers 2030. Par conséquent, les installations de chauffage à énergie fossile ou électrique directe ne seront plus commercialisables sur le marché. Outre les pompes à chaleur à énergie thermique, les systèmes hybrides avec pompes à chaleur sont également intégrés à la réglementation (systèmes non représentés dans le tableau de l'Illustration 1.9). Ces systèmes combinent par exemple une installation de chauffage au gaz et une pompe à chaleur en un seul et même appareil. Toutefois, ils ne devraient rencontrer qu'un écho relatif sur le marché suisse, et ce, notamment en ce qui concerne les appareils de série moins performants.

En parallèle à ces adaptations, l'étiquette-énergie a également fait l'objet d'une révision approfondie (Illustration 1.10). Auparavant appliquée à l'étiquette-énergie et dans la directive sur l'écoconception, la déclaration du niveau de puissance acoustique au point de fonctionnement A7 (charge partielle de 35 % par rapport à A 10) n'a pas fait ses preuves. C'est la raison pour laquelle le point de fonctionnement à une charge partielle de 54 % (A2) sera désormais employé à cette fin. Ce point de fonctionnement est nettement plus représentatif d'une exploitation moyenne sur une année entière. D'ailleurs, cet élément a déjà été pris en considération lors de la révision de l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) effectuée en 2024. Compte tenu des conditions d'exploitation courantes à l'heure actuelle, la température de la source pour l'évaluation de l'énergie et du bruit passera de 0 °C actuellement (B0) à 5 °C (B5) dans le

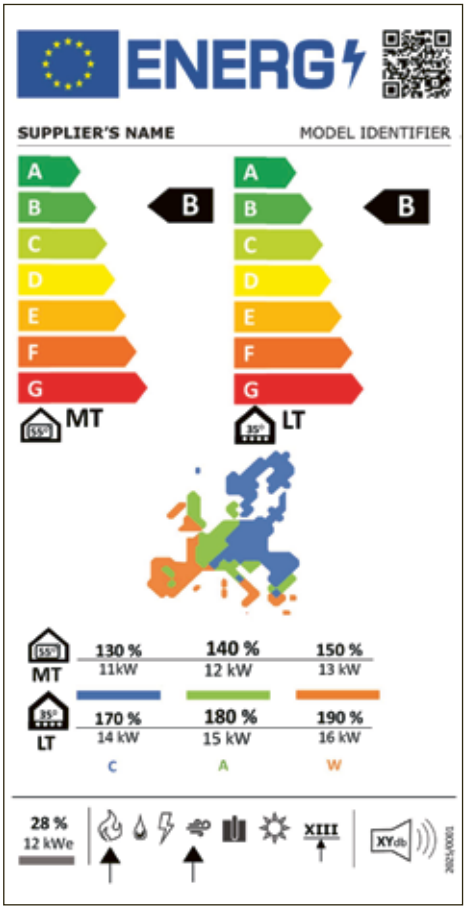


Illustration 1.10: Projet de nouvelle étiquette énergétique pour les générateurs de chaleur. Les données ne sont pas comparables avec la version actuelle (2025).

cas des pompes à chaleur eau glycolée/eau.

Utilisation efficace des matériaux et des ressources et surveillance
Depuis la mi-2024, la directive (UE) 2024/1781 a remplacé la directive 2009/125/CE jusqu'alors en vigueur (directive sur l'écoconception) comme cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie. Ce texte constitue le fondement des exigences décrites dans ce document qui s'appliquent aux générateurs de chaleur.
La directive (UE) 2024/1781 confère désormais un rôle majeur aux termes «durabilité» et «économie circulaire». Les priorités ne sont plus axées uniquement sur les exigences énergétiques. Désormais, elles s'articulent également autour de l'utilisation efficace des matériaux et des ressources. Ainsi, la longévité, la maintenabilité et la réparabilité des appareils revêtent un caractère important. Dans cet ordre d'idées, il est exigé que les pièces de rechange soient disponibles dans un délai de dix jours pendant dix ans suivant la mise sur le marché du produit et que leur montage puisse être effectué à l'aide d'outils conventionnels. Les appareils doivent être facilement maintenables et réparables et les matériaux doivent être recyclables. Par ailleurs, la documentation des produits est également soumise à des exigences qui constituent bel et bien une condition préalable à l'assurance d'un service d'assistance efficace. Parmi ces exigences figurent notamment les vues éclatées.
Le choix d'un appareil efficace ne garantit pas à lui tout seul la longévité, la fiabilité et l'efficacité d'une installation. En effet, son intégration dans l'ensemble du système et la qualité de sa régulation constituent également des facteurs déterminants. C'est la raison pour laquelle les futures exigences en matière d'écoconception visent à établir un cadre qui permettra aussi aux appareils de série d'assurer une surveillance minimale. Selon les prévisions, les appareils devront recueillir et enregistrer les valeurs caractéristiques et afficher celles-ci aux exploitants:
- la consommation d'énergie
- l'énergie thermique fournie
- l'efficacité qui en découle
- le nombre d'impulsions (cycles de mise en marche et d'arrêt)
- le mode de fonctionnement du générateur de chaleur (eau chaude ou chauffage)

Une restriction explicite de la puissance nominale d'une pompe à chaleur (puissance également indiquée sur l'étiquette-énergie) au seul fonctionnement de la pompe à chaleur (sans chauffage d'appoint) nourrit tout du moins les discussions. Jusqu'à présent, l'usage permet de prendre en compte une part considérable de chauffage d'appoint électrique (température de bivalence jusqu'à 2 °C). Selon la législation suisse, de telles installations sont autorisées à être uniquement exploitées sans chauffage par résistance électrique.
D'autres points de discussion portant sur la révision des directives européennes et les générateurs de chaleur concernent le test de conformité. Jusqu'à présent, ce dernier prenait la forme d'une simple autodéclaration. Désormais, il est envisagé de faire effectuer ce test au moyen d'une évaluation indépendante de la conformité réalisée par des «organismes notifiés», soit des tiers indépendants. Par ailleurs, il est probable que l'idée de prendre également en compte le refroidissement des pompes à chaleur réversibles dans l'évaluation de tels appareils demeure non considérée.

Chapitre 2

Composants

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. Les turbocompresseurs sont également appelés «Turbocor» sur le marché. Ces compresseurs Turbocor sans huile, à paliers magnétiques sont utilisés à partir d'une puissance de chauffage d'environ 320 kW, atteignent une température de départ maximale de 48 °C (à pleine charge) et présentent des rendements très élevés en charge partielle (10 % à 70 %). Associé à une aube directrice d'entrée en aspiration, le Turbocor s'adapte parfaitement aux différents états de charge. Ses autres avantages: faible courant de démarrage, électronique de commande entièrement intégrée avec convertisseur de fréquence intégré (CF), faible poids, faible puissance acoustique, pas de pièces d'usure mécanique et, par conséquent, une sécurité de fonctionnement supérieure grâce au nombre réduit d'éléments mobiles.

Modèles

Selon l'application et les coûts, on distingue trois modèles de compresseurs.
- Compresseurs ouverts: 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.
- Compresseurs hermétiques: Le moteur et le compresseur forment un ensemble. Contrairement au modèle se-

Tableau 2.1: Types de compresseurs.

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)	jusqu'à 1000 m^3/h	jusqu'à 500 m^3/h	100 à 10 000 m^3/h	250 à 50 000 m^3/h
Puissance de chauffe (plage à BO/W35)	jusqu'à 800 kW	jusqu'à 400 kW	80 à 8000 kW	100 à 40 000 kW
Rapport de pression en règle générale (à 1 allure)	jusqu'à 10	jusqu'à 10	jusqu'à 30	jusqu'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



Illustration 2.1: Compresseur ouvert à pistons alternatifs (version industrielle). (Source: Grasso)

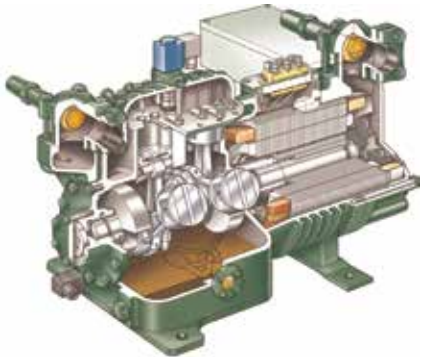


Illustration 2.2: Compresseur semi-hermétique à pistons alternatifs. (Source: Bitzer)

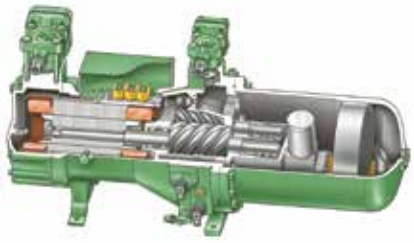


Illustration 2.3: Compresseur semi-hermétique à vis. (Source: Bitzer)



Illustration 2.4: Compresseur hermétique spiral (Scroll). (Source: Copeland)



Illustration 2.5: Compresseur semi-hermétique turbo (exempt d'huile). (Source: Turbocor)

mi-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.

- Compresseurs semi-hermétiques: 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). Pour éviter la friction et l'usure et colmater les fuites dans la chambre de compression, les compresseurs sont généralement lubrifiés avec de l'huile. Le fluide frigorigène se mélange ainsi avec l'huile et peut donc en contenir une forte proportion, en particulier lors des temps d'arrêt du compresseur. Lors du redémarrage du compresseur, le mélange huile-fluide frigorigène se met alors à mousser. Pour éviter ce problème, le récipient de stockage d'huile peut être chauffé, le fluide frigorigène dilué à l'intérieur étant ainsi suffisamment volatilisé (chauffage du carter ou de la cuve à huile).
- Compresseurs exempts d'huile: Par compresseurs exempts d'huile, on entend les compresseurs qui ne présentent aucune lubrification à l'huile grâce à une construction et une fabrication spéciales. 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).

2.2 Échangeur de chaleur

Évaporateur

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

- Evaporation sèche: Le fluide frigorigène est amené vers l'évaporateur par une vanne de détente. Le débit de fluide frigorigène 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.
- Evaporation en système immergé: Le fluide frigorigène est introduit dans l'évaporateur par le biais d'une régulation à flotteur haute pression ou basse pression. La quantité de fluide frigorigène 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 généralement 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 frigorigène 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'ensuit 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 désurchauffeur, 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.

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

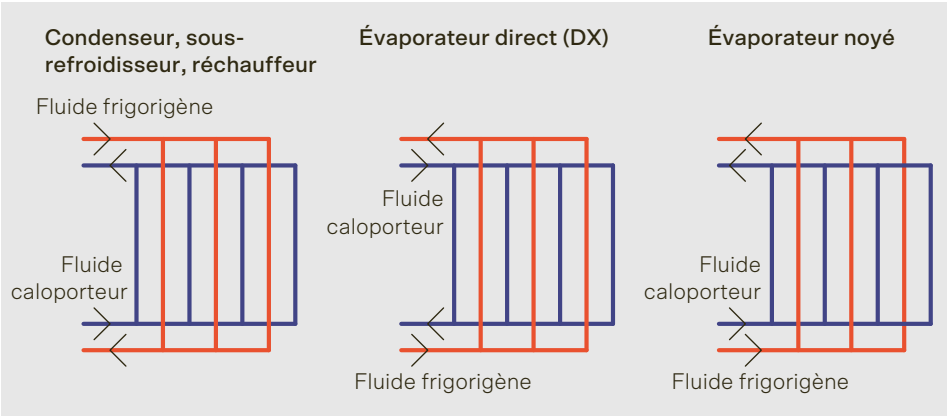


Illustration 2.6: Schéma d'un échangeur de chaleur à plaques.

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. Ce type est principalement utilisé dans les pompes à chaleur jusqu'à env. 200 kW.

– 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 frigorigène nettement plus importante.
– Les échangeurs de chaleur coaxiaux assurent l'échange de chaleur par le biais d'un tube double cintré en spirale, généralement 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



Illustration 2.7: Échangeur de chaleur à plaques. (Source: BMS)



Illustration 2.8: Échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires. (Source: Bitzer)



Illustration 2.9: Échangeur de chaleur coaxial. (Source: Wieland)

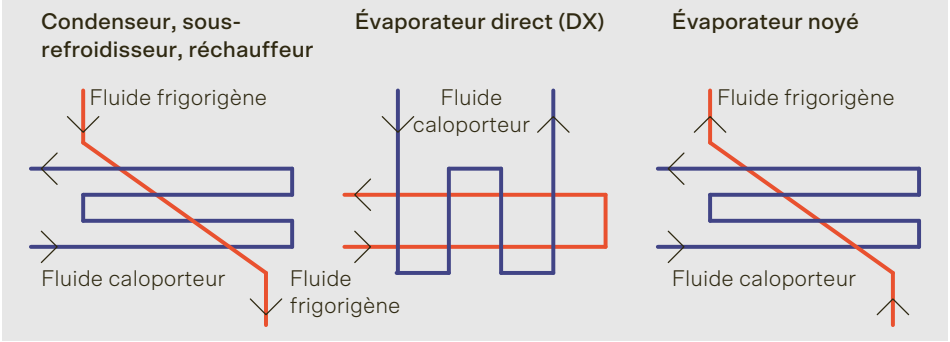


Illustration 2.10: Schéma d'un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires.

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 frigorigène lorsqu'il passe du côté haute pression au côté basse pression du circuit frigorigène. Il régule également le flux du fluide frigorigène en direction de l'évaporateur. Un détendeur correctement dimensionné, notamment une vanne d'expansion électronique, a une influence considérable sur l'efficience d'un processus de pompe à chaleur.

Types de détendeurs

- Les vannes d'expansion régulent le flux du fluide frigorigène en direction de l'évaporateur en utilisant la surchauffe du gaz aspiré à la sortie de l'évaporateur; 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. Le gros avantage de la version électronique est la faible surchauffe du gaz aspiré et la plage de fonctionnement supérieure d'une vanne. Cela est très avantageux lors de différentes conditions de fonctionnement et dans le comportement en charge partielle.
- Les régulateurs à flotteur haute pression acheminent le flux du fluide frigorigène à l'évaporateur en fonction du niveau de fluide du côté haute pression du flotteur. Les régulateurs à flotteur haute pression ne doivent pas être réglés et fonctionnent de manière très stable dans l'ensemble de la plage de fonctionnement de l'installation.
- Les régulateurs à flotteur basse pression fonctionnent de manière analogue aux régulateurs haute pression. Toutefois, ils régulent le flux de fluide frigorigène en fonction du niveau de fluide dans l'évaporateur. Il existe également des modèles électroniques de régulateur à flotteur.



Illustration 2.11: Échangeur de chaleur à registre (bloc de plaques). (Source: Omega)

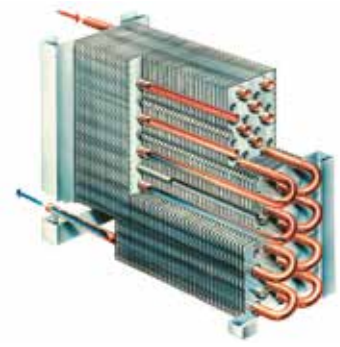


Illustration 2.12: Échangeur de chaleur à lamelles (batterie sans ventilateur, carrosserie etc.). (Source: Günter)



Illustration 2.13: Vanne d'expansion thermostatique. (Source: Danfoss)

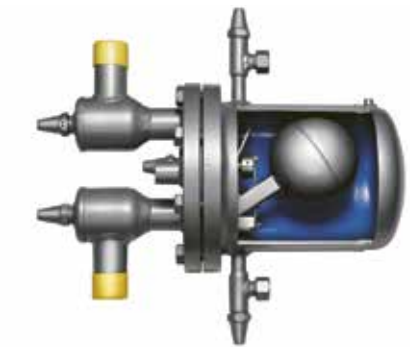


Illustration 2.14: Régulateur à flotteur haute pression. (Source: TH-Witt)

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 frigorigènes 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 frigorigène etc. afin de contrôler la quantité de fluide frigorigène (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 frigorigène, 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 l'amortissement 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 frigorigène pour recueillir le fluide frigorigène 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).
- Chauffage du carter ou de la cuve à huile pour empêcher la dilution du fluide frigorigène dans l'huile pendant les temps d'arrêt.

2.6 Dispositifs de dégivrage

Les échangeurs de chaleur à lamelles – p. ex. comme évaporateur de pompes à chaleur air-eau – 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.

By-pass gaz chauds (Illustration 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.

Dégivrage par inversion du cycle (Illustration 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

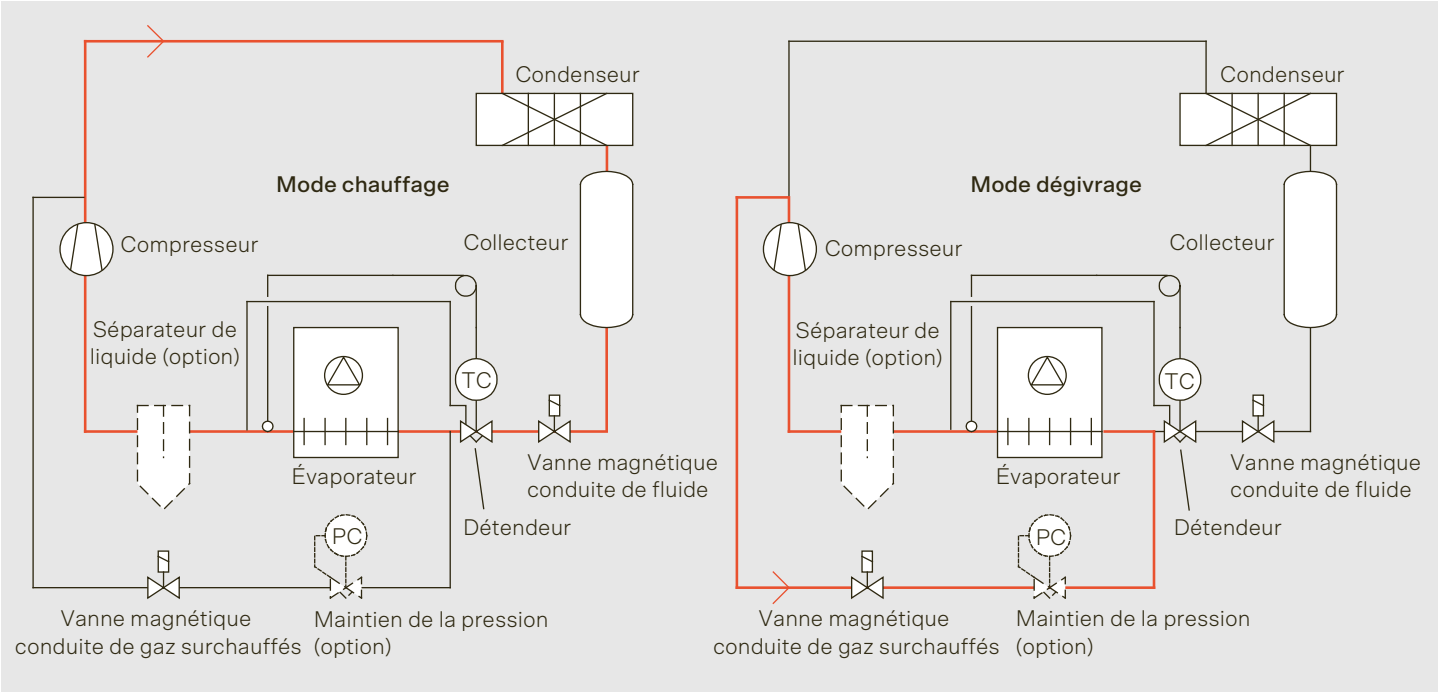


Illustration 2.15: Schéma de principe pour le dégivrage d'un by-pass gaz chauds.

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 soutire de la chaleur. La puissance nécessaire pour le dégivrage correspond à 2 ou 3 fois la puissance électrique absorbée par le compresseur.

Dégivrage naturel
Au-dessus de 2 à 3 °C environ, la solution la plus rapide et efficiente pour le dégivrage de l'évaporateur est l'utilisation du ventilateur uniquement, qui peut être combiné sans problème avec d'autres méthodes 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 Processus alternatifs

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.

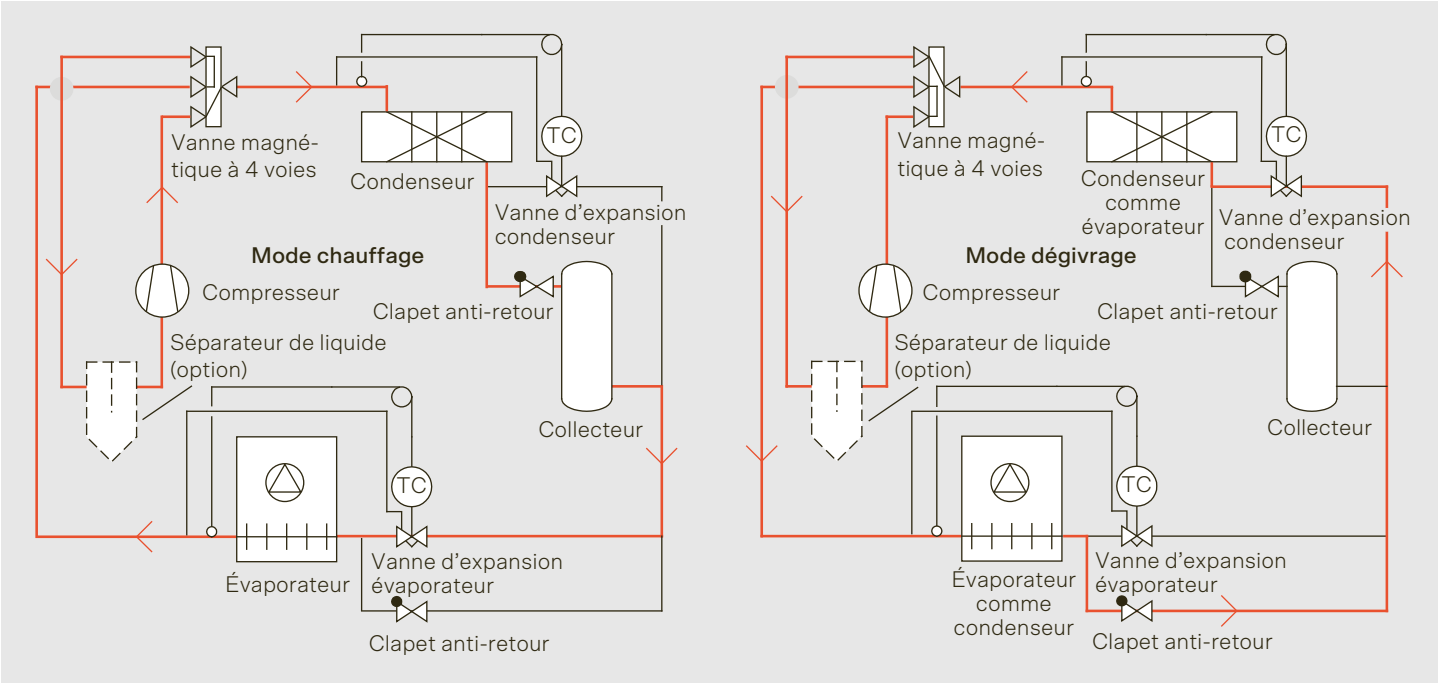


Illustration 2.16: Schéma de principe d'un cycle inversé.

Chapitre 3

Fluide frigorigène

3.1 Propriétés

Le fluide frigorigène est l'agent frigorigène 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 les pompes à chaleur. Dans la mesure du possible, tout fluide frigorigène devrait présenter les caractéristiques suivantes:

- bonnes propriétés thermodynamiques
- Puissance frigorifique volumétrique élevée (→ petit compresseur). Valeurs typiques dans l'Illustration 3.1)
- 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
- stabilité chimique et thermique
- non toxique
- non inflammable, non explosif
- bonne miscibilité avec les lubrifiants
- un potentiel de déplétion ozonique (Ozone Depletion Potential, ODP, = 0 dans l'idéal) le plus faible possible
- un potentiel de réchauffement global (Global Warming Potential, GWP, = 0 dans l'idéal) le plus faible possible
- prix avantageux

On distingue six catégories de fluides frigorigènes:

- Les CFC (hydrochlorofluorocarbures entièrement halogénés), sont très nocifs pour la couche d'ozone et générateurs d'effet de serre.
- Les HCFC (hydrochlorofluorocarbures partiellement halogénés) sont nocifs pour la couche d'ozone et générateurs d'effet de serre.
- Les HCFO (hydrochlorofluorooléfines, hydrocarbures insaturés partiellement halogénés) ne sont pas nocifs pour la couche d'ozone et présentent de faibles valeurs de GWP.
- Les HFC/PFC (hydrocarbures fluorés partiellement halogénés) sont exempts de chlore et donc non nocifs pour la couche d'ozone, mais néanmoins générateurs d'effet de serre.
- Les fluides frigorigènes naturels ne détruisent pas la couche d'ozone et n'influencent pas le climat. Ces substances sont toutefois partiellement toxiques (ammoniac), inflammables (propane) ou nécessitent des pressions d'exploitation élevées (CO_2). On peut remédier à ces inconvénients de façon constructive (p. ex. intégration de la PAC dans un boîtier). Pour des considérations écologiques, il faudrait

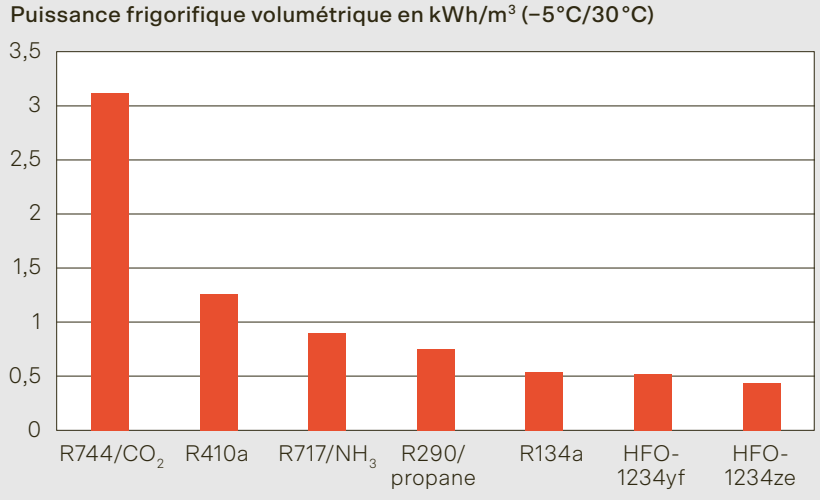
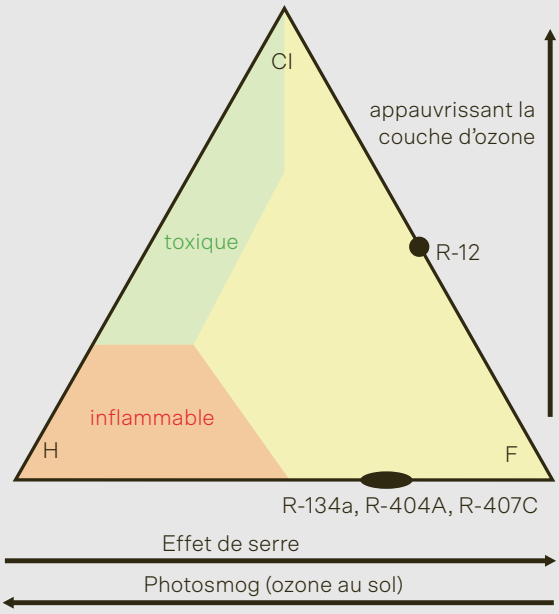


Illustration 3.1: Puissance frigorifique volumétrique de certains fluides frigorigènes en kWh/m³.

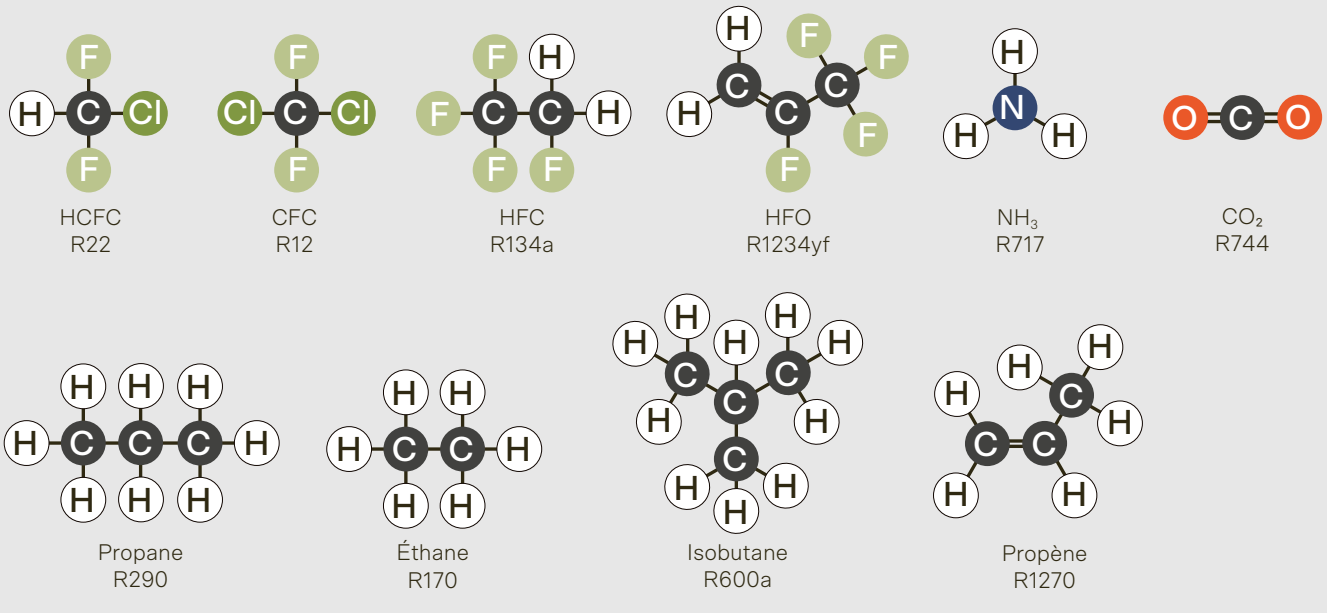
utiliser des fluides frigorigènes naturels.
– HFO (oléfines hydrofluorés). Les PFC insaturés, c.-à-d. ceux comportant au moins une double liaison entre deux atomes de carbone (C = C). D'un point de vue chimique, de telles substances appartiennent à la catégorie des oléfines qui regroupe l'ensemble des hydrocarbures acycliques. Les HFO ont été développés en alternative aux substances stables, génératrices d'effet de serre. La liaison double crée dans la molécule une sorte de «point de rupture», point à partir duquel celle-ci se dégrade et se transforme en d'autres substances dans l'atmosphère, et ce, à un rythme relativement soutenu. En raison de leur faible potentiel de réchauffement global, les HFO sont également appelés fluides frigorigènes Low-GWP. Une plus large utilisation de ce groupe de fluide frigorigène est encore incertaine notamment en raison du manque d'expérience à long terme. (voir chapitre 3.8 PFAS et TFA).

Illustration 3.2: Propriétés des fluides frigorigènes synthétiques à l'exemple des dérivés halogénés du méthane et de l'éthane.



Les propriétés des réfrigérants synthétiques sont illustrées par les dérivés du méthane et de l'éthane présentés dans l'Illustration 3.2. Le Tableau 3.1 donne un aperçu des catégories de réfrigérants avec des informations sur les classes de danger et les indicateurs d'impact environnemental. L'Illustration 3.3 montre les structures chimiques de certains réfrigérants.

Illustration 3.3: Les propriétés des fluides frigorigènes synthétiques dépendent essentiellement des atomes de chlore (Cl) et de fluor (F) et des liaisons doubles (C=C). (Source: Andreas Genkinger, FHNW INEB)



3.2 Désignation des fluides frigorigènes selon l'ASHRAE

Les fluides frigorigènes sont désignés selon le système de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Leur désignation se compose des éléments suivants: La lettre R signifie Refrigerant. Elle est suivie d'un maximum de trois chiffres qui, dans le cas des fluides frigorigènes organiques, décrivent leur composition et indiquent le nombre de liaisons doubles carbone-carbone, le nombre d'atomes d'hydrogène et le nombre d'atomes de fluor. Pour finir, une lettre spécifie la disposition des atomes autour des chaînes carbonées (Illustration 3.4). À titre d'exemple, dans R-22B1, le chlore n'est pas explicitement indiqué, au contraire du brome et de l'iode. Ce type de désignation s'applique uniquement aux corps purs. Les désignations des mélanges commencent par R4 ou R5. Les numéros qui suivent sont attribués de façon continue et ne fournissent aucune indication concernant la composition chimique.
Les fluides frigorigènes du groupe 4 (R4...) sont des mélanges zéotropiques à glissement de température. Autrement dit, la température d'évaporation et la température de condensation dépendent de la proportion des composants du mélange. Les fluides frigorigènes du groupe 5 (R5...) ne présentent aucun glissement de température notable (fluides azéotropiques) et se comportent donc comme des fluides frigorigènes purs.

Désignation des fluides frigorigènes organiques

R	Refrigerant = fluide frigorigène
a	Nombre de liaisons doubles
b	Nombre d'atomes de carbone -1
c	Nombre d'atomes d'hydrogène +1
d	Nombre d'atomes de fluor
Appendix	Disposition des atomes autour du noyau de carbone

Illustration 3.4: Structure de la désignation des fluides frigorigènes selon l'ASHRAE.

Le premier chiffre des fluides frigorigènes inorganiques est un 7 (R7...) et les chiffres suivants indiquent la masse moléculaire exprimée en unités de masse atomique «u».
Exemple de l'ammoniac: R717 (NH_3)
Masses atomiques: N = 14 u et H = 1 u
Total (masse moléculaire) = 14 u + 3 x 1 u = 17 u

L'utilisation admissible de fluides frigorigènes est réglée dans l'annexe 2.10 de l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Sa mise en œuvre doit encourager l'utilisation de fluides frigorigènes naturels présentant un potentiel de réchauffement global réduit.

3.3 Choix du fluide frigorigène

Pour des raisons de sécurité et de protection de l'environnement, il est en principe important de limiter la quantité de fluides frigorigènes. Les exigences techniques de sécurité relatives à l'utilisation des différents fluides frigorigènes sont définies dans la SN EN 378. Les fluides frigorigènes détruisant la couche d'ozone (HCFC et CFC) ne sont légalement plus autorisés dans les PAC et les installations frigorifiques. À puissance et efficience égales, il convient d'utiliser un fluide frigorigène présentant un potentiel à effet de serre (GWP) plus faible.
L'utilisation admissible de fluides frigorigènes est réglée dans l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Sa mise en œuvre doit renforcer l'utilisation de fluides frigorigènes naturels présentant un potentiel d'effet de serre réduit.
Dans quelques cas particuliers, il est possible de demander une dérogation à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Un formulaire de demande pour dérogation pour installation frigorifique ainsi que des informations complémentaires figure sur le site de l'Office fédéral de l'environnement OFEV: www.bafu.admin.ch/fr/produits-chimiques

Catégorie de fluide frigorigène			Fluide frigorigène (exemples)	ODP[1]	GWP[2]	Groupe de sécurité[3]	Dispositions de l'ORRChim applicables aux installations contenant des fluides frigorigènes
Frigorigènes appauvrissant la couche d'ozone	CFC	Fluides purs	R11 R12 R13 R13B1	1000 1000 1000 10 000	4750 10 900 14 400 7140	A1 A1 A1 A1	– Mise sur le marché: interdite – Remplissage: interdit – Déclaration obligatoire et livret d'entretien: installations contenant plus de 3 kg de mélange – Contrôle d'étanchéité: installations contenant plus de 3 kg de fluide
		Mélanges	R502	0,334	4657	A1	
	HCFC	Fluides purs	R22	0,055	1810	A1	
		Mélanges (blends), en général à base de R22	R401A (MP39) R402A (HP80) R402B (HP81) R408A (FX-10) R409A (FX-56)	0,037 0,021 0,033 0,021 0,048	1182 2788 2416 3152 1585	A1 A1 A1 A1 A1	
	HCFO	Fluides purs	R1233zd(E) R1233zd(Z) R1224yd(Z)	<0,0004 0,0004 0,00023	3,7 0,4 0,8	A1 A1 A1	– Mise sur le marché: interdite sauf si selon l'état de la technique on ne connaît pas encore de substitut et si des mesures ont été prises pour éviter les émissions de frigorigènes – Remplissage: autorisé – Déclaration obligatoire et livret d'entretien: installations contenant plus de 3 kg de fluide – Contrôle d'étanchéité: installations contenant plus de 3 kg de fluide
Frigorigènes stables dans l'air	HFC/PFC	Fluides purs	R23 R32 R125 R134a R143a	0 0 0 0 0	14 800 675 3500 1430 4470	A1 A2L A1 A1 A2L	– Mise sur le marché: autorisée de manière limitée selon la puissance frigorifique, le potentiel d'effet de serre et les circuits secondaires. Condition pour une dérogation: l'état de la technique ne permet pas de respecter les exigences de sécurité selon les normes SN EN 378-1, -2 et -3 sans utiliser un frigorigène stable dans l'air. – Remplissage d'installations ≥ 40 t d'équivalent CO_2 si le PRG du fluide frigorigène est ≥ 2500: uniquement des frigorigènes régénérés. Remplissage interdit dès le 1er janvier 2030. – Déclaration obligatoire et livret d'entretien: installations contenant plus de 3 kg de fluide – Contrôle d'étanchéité: installations contenant plus de 3 kg de frigorigène ou plus de 5 t d'équivalent CO_2
		Mélanges (blends)	R404A R407C R407F R410A R413A R417A R422A R422D R437A R507A R508A R508B	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3922 1774 1825 2088 2053 2346 3143 2729 1805 3985 13 214 13 396	A1 A1 A1 A1 A2 A1 A1 A1 A1 A1 A1 A1	
		Mélanges avec HFO (blends)	R448A R449A R450A R452A R454C R455A R513A	0 0 0 0 0 0 0	1386 1396 601 2140 146 146 630	A1 A1 A1 A1 A2L A2L A1	

1 Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP), valeurs pour les CFC et les HCFC selon les annexes A et C du Protocole de Montréal, valeurs pour les HCFO, CFC, HFO et les frigorigènes naturels selon WMO (2018) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018; valeurs ODP pour les mélanges: moyenne des ODP des composants, pondérés en fonction des proportions massiques correspondantes des substances pures.

2 Potentiel d'effet de serre (GWP) à un horizon de 100 ans. Valeurs pour les CFC, HCFC, HFC/HCFC et les frigorigènes naturels selon GIEC (2007). Valeurs pour les HCFO selon WMO (2018). Valeurs pour les HFO selon IPCC (2014). Valeurs pour les mélanges: moyenne des GWP des composants, pondérés en fonction des proportions massiques correspondantes des substances pures.

3 Groupes de sécurité selon la norme SN EN 378-1:2017; pour le R-454C, le R-455A et le R-1336mzz(Z) selon le Refrigerant Report 20 de Bitzer (pp. 27 et 37).

Tableau 3.1: Vue d'ensemble des principaux fluides frigorigènes (liste non exhaustive), état septembre 2020. L'utilisation admissible de fluides frigorigènes est réglée dans l'annexe 2.10 de l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). (Source: OFEV)

Catégorie de fluide frigorigène			Fluide frigorigène (exemples)	ODP[1]	GWP[2]	Groupe de sécurité[3]	Dispositions de l'ORRChim applicables aux installations contenant des fluides frigorigènes
Frigorigènes n'appauvrissant pas la couche d'ozone et qui ne sont pas stables dans l'air	Fluides frigorigènes naturels	Fluides purs	R170 (éthane) R290 (propane) R717 (NH_3) R718 (H_2O) R744 (CO_2) R600 (butane) R600a (isobutane) R1270 (propène)	– 0 – – 0 0 0 0	6 3 0 0 1 4 3 2	A3 A3 B2L A1 A1 A3 A3 A3	– Mise sur le marché: autorisée – Remplissage: autorisé – Déclaration obligatoire et livret d'entretien: installations contenant plus de 3 kg de fluide – Contrôle d'étanchéité: pas de prescriptions
		Mélanges (blends)	R290/R600a R290/R170 R723 (DME/NH_3)	0 0 0	3 3 8	A3 A3 –[4]	
	HFO		R1234yf R1234ze R1336mzz(Z)	0 0 0	<1 <1 2	A2L A2L A1	

4 R-723 n'est pas répertorié dans la SN EN 378-1:2017; s'il est composé de 40 % d'ammoniac et de 40 % de DME, il peut toutefois être considéré comme toxique et non combustible; voir les données du fabricant.

Suite du Tableau 3.1.

3.4 Fluides frigorigènes naturels

Exemple du propane

En raison de son faible GWP et de ses propriétés thermodynamiques remarquables, le propane (R290) fait l'objet d'une utilisation croissante en tant que fluide frigorigène dans les pompes à chaleur. Le R290 est facilement inflammable (classe de sécurité A3 selon la norme SN EN 378-1). Par conséquent, il exige impérativement que sa manipulation, son stockage et la configuration du système soient effectués de manière appropriée. La structure de la pompe à chaleur et les composants électriques utilisés doivent être conformes aux exigences de sécurité spécifiées dans la directive européenne ATEX 114. Plusieurs exigences strictes s'appliquent à l'installation, au marquage de sécurité, au zonage pour atmosphères inflammables dues à la présence de gaz, à la maintenance et à l'élimination des fluides frigorigènes. Les valeurs limites concernant les quantités de remplissage sont réglementées par la norme SN EN 378-1 en fonction du lieu d'installation et de la classe de sécurité. Dans le cas de pompes à chaleur monobloc en intérieur, la quantité de remplissage maximale autorisée pour les fluides frigorigènes est de 150 g par cycle frigorifique. Des quantités de remplissage supérieures sont admises, mais elles nécessitent l'obtention d'une vérification appropriée et l'application de mesures adéquates conformément aux exigences de la norme SN EN 378-1. En raison de la limitation des quantités de remplissage, les pompes à chaleur monobloc installées en extérieur sont le type de pompe qui est généralement proposé. Les pompes à chaleur en intérieur utilisent des capteurs de fuite de gaz et des systèmes de ventilation de secours afin de détecter d'éventuelles fuites de gaz des fluides frigorigènes et d'évacuer ces gaz de façon sûre.

Concepts de sécurité

Le R290 est plus lourd que l'air. C'est la raison pour laquelle les fuites de gaz se concentrent près du sol. Par ailleurs, les pompes à chaleur installées en extérieur doivent respecter les distances de sécurité prévues entre elles et les ouvertures de bâtiments, telles que des fenêtres, des portes et des sauts-de-loup. Le passage des conduites dans les maisons doit être étanche au gaz. Les exigences relatives aux distances spécifiées par les fabricants doivent être respectées scrupuleusement. Un exemple d'installation d'une pompe à

chaleur au propane est proposé par l'Illustration 3.5.
Le gel et toute autre dégradation du condenseur doivent être évités en toutes circonstances. La fuite du gaz de fluide frigorigène R290 dans le circuit de chauffage et de charge constitue un point critique.
Les mesures de prévention d'une fuite dans le circuit de chauffage et de charge sont les suivantes:

- l'utilisation d'un échangeur de chaleur de sécurité à double paroi en tant que condenseur
- l'utilisation de soupapes antigel dans les conduites du circuit de chauffage et de charge afin d'évacuer l'eau en cas de risque de gel
- l'utilisation d'un circuit d'eau (glycolée) supplémentaire entre la pompe à chaleur et le circuit de chauffage et de charge afin de limiter les fuites à la partie du système située en extérieur. Dans un souci d'efficacité, il est impératif de prévoir un échangeur de chaleur à basse température (recommandation: 1 à 2 K).

Si le condenseur était endommagé malgré l'application de ces mesures, le fluide frigorigène serait alors susceptible de pénétrer progressivement dans le circuit de chauffage et de charge même en cas de petite fuite. Un microdégazeur intégré à l'appareil en extérieur ou une conduite d'évacuation des gaz en intérieur permettent d'évacuer le gaz de fluide frigorigène. Dans le cas de fuites plus importantes, le fluide frigorigène doit être évacué au moyen d'une soupape de surpression (Illustration 3.6).
Afin de travailler sur des appareils au propane (R290), il est nécessaire de posséder un équipement de sécurité, un détecteur de fuites de gaz et un extincteur pour gaz combustibles. Les spécialistes doivent être formés et certifiés. Ils doivent disposer du permis pour l'utilisation de fluides frigorigènes, du certificat CFST et de connaissances relatives aux mesures d'urgence.
Les installations doivent impérativement faire l'objet d'inspections régulières menées à l'aide de détecteurs de fuites de gaz. Celles-ci ne sont toutefois pas nécessaires dans le cas de petites installations dont les quantités de remplissage sont inférieures à 150 g.
Il est recommandé d'effectuer avec une extrême précaution des travaux de maintenance susceptibles de générer des sources d'inflammation, tels que le brasage fort ou la réparation de composants électriques, ou bien d'éviter leur réalisation dans la mesure du possible (voir chapitre 11.3 Maintenance).
Attention: Les points mentionnés ci-dessus s'appliquent également à des appareils fonctionnant à l'éthane (R170), à l'isobutane (R600a), au propène (R1270) et avec d'autres mélanges.

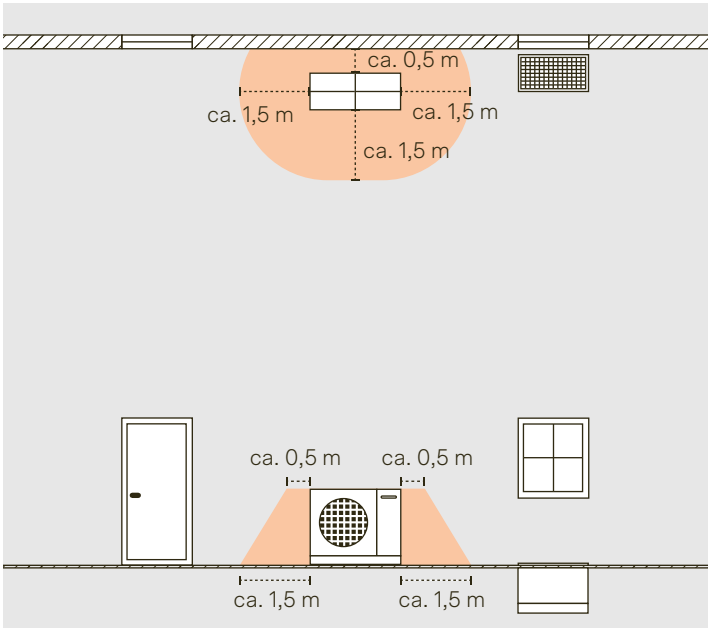


Illustration 3.5: Exigences relatives à l'installation d'une pompe à chaleur au propane.

Exemple de l'ammoniac
L'ammoniac (R717) est un fluide frigorigène efficace et écologique (GWP et ODP = 0). En raison de sa toxicité, de son inflammabilité et de ses propriétés corrosives (classe de sécurité B2L), son usage exige toutefois une prudence toute particulière et l'application de plusieurs mesures.
Du fait de la toxicité de l'ammoniac déjà présente dans de faibles concentrations, les systèmes fonctionnant avec

ce fluide sont soumis à des prescriptions strictes et conformes aux exigences de la norme SN EN 378. L'inhalation de fortes concentrations d'ammoniac est susceptible de présenter de graves répercussions sur la santé. Parmi celles-ci figurent notamment des irritations des voies respiratoires, des atteintes pulmonaires et la mort dans certains cas extrêmes.
L'ammoniac est un combustible de moins bonne qualité que le propane (R290), mais il est néanmoins capable de brûler dans l'air à des concentrations allant de 16 % à 25 % en volume. Il est nécessaire de prendre des mesures de précaution afin d'éviter toute source d'inflammation dans les zones où l'ammoniac serait susceptible de se concentrer. Ce point est particulièrement valable pour les locaux fermés. Les appareils électriques situés à l'intérieur de ces derniers doivent être antidéflagrants.
L'ammoniac est corrosif, notamment s'il est exposé au cuivre et à ses alliages. C'est la raison pour laquelle des composants, tels que les conduites, les soupapes et les robinets, sont généralement fabriqués en acier (inoxydable) ou en aluminium.

D'une manière générale, l'ammoniac est utilisé pour de grandes pompes à chaleur et installations frigorifiques commerciales et industrielles, et ce, notamment pour des patinoires ou des installations de chauffage à distance. Dans ces cas-là, la forte enthalpie de vaporisation spécifique de l'ammoniac (R717) permet de recourir à de petits groupes.
En raison de la toxicité et de la complexité des systèmes, l'ammoniac n'est en revanche guère utilisé dans des bâtiments d'habitation ou dans de petites installations. Afin de réduire les risques à leur niveau minimal, les installations à l'ammoniac sont souvent posées en extérieur ou dans des locaux techniques spécifiques où il est possible d'intervenir facilement en cas de fuite. En intérieur, il est obligatoire de disposer de détecteurs de fuites de gaz et de systèmes de ventilation de secours qui permettent d'évacuer d'éventuelles fuites d'ammoniac rapidement et sûrement. Les systèmes de coupure d'urgence et les soupapes de sécurité automatiques revêtent un caractère particulièrement important dans des pompes à chaleur à l'ammoniac afin d'isoler rapidement le fluide frigorigène en cas de fuite ou de défaillance. Dans

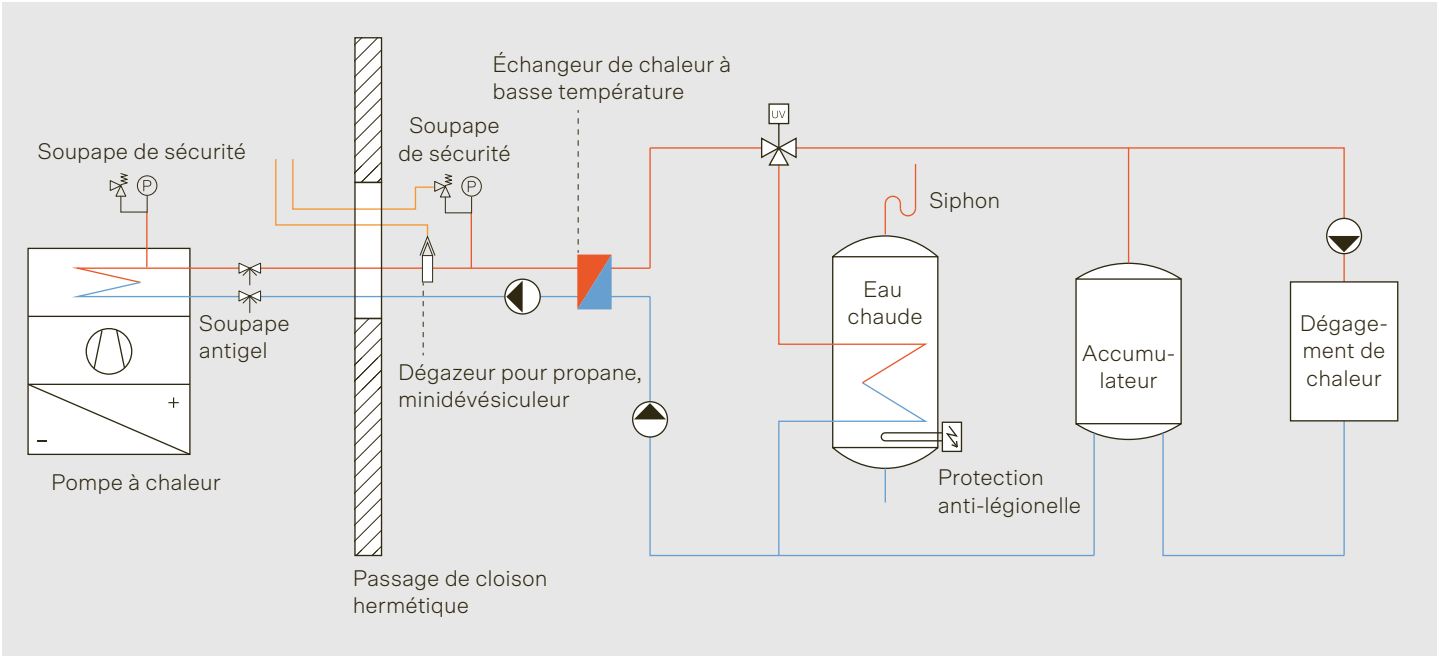


Illustration 3.6: Mesures de sécurité pour pompes à chaleur au propane (fluide frigorigène).

le cas spécifique des environnements industriels, il est nécessaire de prévoir des plans d'urgence afin de répondre à un éventuel dégagement d'ammoniac. Le stockage et la manipulation de l'ammoniac sont soumis à l'application de protocoles de sécurité stricts. Ces processus nécessitent des récipients spéciaux, un marquage approprié et des lieux de stockage sûrs.
Les spécialistes qui travaillent au contact de systèmes à l'ammoniac doivent suivre la formation pour l'obtention du «permis pour l'utilisation de fluides frigorigènes», à savoir les cours de l'ASF «Bases du froid / Formation élémentaire en froid» et «Environnement & écologie». Une utilisation sûre des installations à l'ammoniac exige l'obtention de connaissances relatives aux thèmes suivants:

- une maintenance correcte et l'inspection destinée à vérifier la présence de fuites, de corrosion et d'anomalies de pression
- le dimensionnement des systèmes et les procédures d'installation
- les procédures de maintenance pour éviter les accidents
- les programmes de certification et de formation

Par ailleurs, les équipements de protection individuelle (EPI) doivent être également mis à la disposition des ouvriers et du personnel de maintenance sur chaque site.

Exemple du dioxyde de carbone
En raison de son faible potentiel de réchauffement global (GWP = 1) et de son aspect écologique (ODP = 0), le dioxyde de carbone (CO_2, R744) va faire l'objet d'une utilisation croissante à l'avenir. Lors de la planification, de l'installation et de l'exploitation de pompes à chaleur au CO_2, les propriétés thermodynamiques et opérationnelles du CO_2 imposent quelques réflexions particulières.
Les installations au dioxyde de carbone fonctionnent à des pressions bien supérieures à celles d'installations alimentées en fluides frigorigènes traditionnels. Selon l'utilisation et les conditions d'exploitation du système, les pressions sont généralement comprises entre 30 et 130 bar. Les composants, tels que des compresseurs, des échangeurs de chaleur et des conduites, doivent être dimensionnés pour de telles pressions afin de garantir sécurité et fiabilité.

Fonctionnement transcritique, rendement thermodynamique et COP:
D'après les indications de l'Illustration 3.1, le CO_2 présente une puissance frigorifique ou calorifique volumétrique relativement élevée. Autrement dit, d'importantes quantités de chaleur sont transférées pour chaque unité de volume, ce qui permet de réaliser des unités compactes. Au contraire de nombreux autres fluides frigorigènes, le CO_2 est souvent exploité dans la zone transcritique pour des applications de chauffage, et ce, notamment lorsque des températures de sortie élevées sont nécessaires. Dans le cycle transcritique, le gaz ne se condense pas entièrement. En effet, il traverse un refroidisseur de gaz au lieu de passer par un condenseur. Ce processus nécessite une conception de système spécifique afin d'optimiser le transfert thermique et de maintenir son efficacité dans la zone transcritique.
Les pompes à chaleur au CO_2 conviennent bien aux applications commerciales et industrielles qui requièrent une production d'eau chaude ou un chauffage des locaux à haute température (hôpitaux, hôtels, transformation des denrées alimentaires, chauffage à distance, etc.). Dans le cas des ménages privés, elles sont tout particulièrement utilisées pour produire de l'eau chaude.
Les pompes à chaleur au CO_2 nécessitent des composants spécifiques, tels que des compresseurs, des refroidisseurs de gaz et des échangeurs de chaleur, qui sont dimensionnés pour un fonctionnement transcritique et à haute

pression. Le COP des pompes à chaleur au CO_2 présente un niveau relativement satisfaisant à basses températures de sortie. Toutefois, l'efficacité diminue en cas de température supérieure, et ce, en raison du comportement en régime transcritique. C'est la raison pour laquelle des compressions multiétagées et des éjecteurs sont souvent utilisés afin d'augmenter le rendement. L'optimisation d'un système au CO_2 exige une commande précise des niveaux de pression et de température afin de maintenir l'efficacité dans différentes conditions d'exploitation.

Exigences en matière d'installation et de maintenance: Les spécialistes de l'installation doivent être formés à l'utilisation de systèmes à haute pression et doivent éventuellement disposer d'outils et de techniques spécifiques pour effectuer la maintenance et des réparations. Une maintenance régulière s'avère indispensable pour garantir que des dispositifs de régulation de pression et de température restent dans les limites de dimensionnement fixées et pour éviter des pertes d'efficacité ou l'usure des composants.

Considérations de coûts: Les coûts d'acquisition des pompes à chaleur au CO_2 sont généralement supérieurs à ceux des systèmes à fluide frigorigène conventionnels, car elles requièrent des composants résistant aux hautes pressions et des conceptions spécifiques. Toutefois, leurs coûts d'exploitation moindres permettent de réaliser des économies à long terme, et ce, notamment lorsque le système peut assurer une fourniture combinée de froid et de chaleur de haute température. Les pompes à chaleur au CO_2 sont particulièrement efficaces à cet égard.

3.5 Quantité de remplissage maximale en fluide frigorigène selon la norme SN EN 378-1

S'il est autorisé d'utiliser le fluide frigorigène à des fins visées par l'ORRChim, il est alors nécessaire de déterminer la quantité de remplissage maximale conformément aux exigences de la norme SN EN 378-1. La protection des personnes pour la zone d'accès concernée et le lieu d'installation de la pompe à chaleur sont encadrés par des restrictions. Il est possible de distinguer les catégories suivantes:

a une zone d'accès générale (hôpitaux, écoles, hôtels, etc.)
b une zone d'accès surveillée (locaux commerciaux, laboratoires, bureaux, etc.)
c une zone d'accès réservée aux personnes autorisées (halles de production, etc.)

Les lieux d'installation sont classés comme suit:

- classe I: appareils mécaniques dans la zone de séjour des personnes (pompe à chaleur, éléments conducteurs de fluide frigorigène)
- classe II: compresseurs dans le local technique ou à l'air libre (conduites dans la zone de séjour des personnes)
- classe III: local technique ou à l'air libre (tous les éléments conducteurs de fluide frigorigène dans un local technique ou à l'air libre)
- classe IV: enceinte ventilée (tous les éléments conducteurs de fluide frigorigène dans une enceinte ventilée)

Lors de la détermination ou du calcul de la limitation de la quantité de remplissage en fluide frigorigène, la toxicité et l'inflammabilité sont prises en compte conformément aux valeurs des tableaux de classification de la norme SN EN 378-1. L'aide à la planification électronique de l'Association Suisse du Froid (ASF) permet de simplifier l'application des exigences de la norme: https://bit.ly/ASF_378.

3.6 Effet de serre et indice TEWI

Le TEWI (Total Equivalent Warming Impact, impact de réchauffement total équivalent) désigne une méthode qui permet d'évaluer le réchauffement global. Il prend en compte aussi bien les émissions directes des fluides frigorigènes dans l'atmosphère que les émissions indirectes générées par l'énergie nécessaire au fonctionnement. Dans une installation donnée, le TEWI comprend:

- l'influence directe sur l'effet de serre par fuites de fluides frigorigènes sous certaines conditions;
- l'influence indirecte sur l'effet de serre provenant des émissions de CO_2, dues à l'énergie requise pour faire fonctionner l'installation pendant sa durée de vie.

Important pour l'indice TEWI:

- L'utilisation de l'indice TEWI est efficace pour évaluer l'effet de serre.
- L'indice TEWI peut être calculé au moyen de la formule mentionnée dans l'encart intitulé «Méthode de calcul du TEWI».
- Le rendement énergétique a une grande influence sur le TEWI (par la réduction de la consommation d'énergie).
- L'indice TEWI peut être fortement réduit si la PAC est alimentée par de l'électricité verte produite exclusivement à partir de sources d'énergie renouvelable.
- L'indice TEWI exerce une influence sur les frais d'exploitation.

Mesures efficaces pour réduire l'indice TEWI:

- Utiliser des fluides frigorigènes naturels ou présentant un faible GWP.
- Construction, resp. choix de l'installation frigorifique optimale et du fluide frigorigène
- Optimisation de l'installation pour obtenir des valeurs COP/EER et/des rendements maximaux
- Maintenance professionnelle, sans fuites de fluides frigorigènes
- Récupération et/ou recyclage des fluides frigorigènes usés

Procédé de calcul pour le TEWI

TEWI = Total Equivalent Warming Impact

$$TEWI = (GWP \cdot L \cdot n) + (PES \cdot m \cdot [1 - \alpha_{Récupération}]) + (n \cdot E_{an} \cdot \beta)$$

Avec

$PES \cdot L \cdot n$	la part des pertes par fuite
$(PES \cdot m\ [1 - \alpha_{Récupération}])$	la part des pertes par récupération
$(n \cdot E_{an} \cdot \beta)$	la part des pertes par consommation d'énergie

Hypothèse

TEWI	l'impact de réchauffement total équivalent en kg CO_2
PES	le potentiel d'effet de serre, rapporté au CO_2
L	les fuites en kg par an
n	la durée de vie de l'installation par an
m	la quantité de remplissage en fluide frigorigène en kg
$\alpha_{Récupération}$	le facteur de récupération, resp. de recyclage (0 à 1)
E_{an}	la consommation d'énergie en kWh par an
β	les émissions de CO_2 en kg par kWh

3.7 Life Cycle Climate Performance (LCCP)

La Life Cycle Climate Performance (LCCP) est un indice encore plus complet qui permet d'évaluer l'ensemble des incidences environnementales d'une pompe à chaleur ou d'une installation frigorifique tout au long de son cycle de vie. Cet outil prend en compte les émissions directes des fluides frigorigènes et les émissions indirectes liées à la consommation d'énergie, à la production, au transport et à l'élimination (Illustration 3.7). Le GWP et le TEWI constituent des indices partiels de cette méthode.

LCCP = émissions directes + émissions indirectes + émissions liées à la fabrication et à l'élimination et exprimées en kilogramme d'équivalent CO_2 (kg CO_2eq)

Les émissions directes sont générées par des fuites tout au long du cycle de vie de la pompe à chaleur et pendant la maintenance et la mise hors service.
Les fluides frigorigènes à faible GWP (R32, R290, CO_2, etc.) sont de plus en plus privilégiés afin de réduire les incidences des fuites.
Les émissions indirectes comprennent la consommation d'énergie pendant l'exploitation des pompes à chaleur, et ce, en fonction de l'intensité carbone de l'alimentation électrique. Les fortes valeurs d'efficacité énergétique (COP, SCOP, COPA) jouent un rôle décisif dans le but de réduire les émissions liées à l'énergie à leur niveau minimal.
Par ailleurs, il convient de prendre en compte les impacts produits par les facteurs suivants:

- la fabrication des composants et des fluides frigorigènes
- les transports de la pompe à chaleur entre l'usine et le consommateur final
- l'ensemble de la chaîne logistique, l'élimination et le recyclage

Les produits à longue durée de vie améliorent la LCCP et une maintenance régulière permet de garantir leur efficacité.
Les pompes à chaleur fonctionnant à partir d'énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire) ou installées dans des régions à alimentation électrique bas carbone présentent des émissions indirectes bien inférieures à celles des pompes à chaleur exploitées avec une électricité issue de combustibles fossiles. La LCCP dépend également du climat et des conditions de charge. À titre d'exemple, la consommation d'énergie électrique des pompes à chaleur est supérieure dans les régions froides.
Les systèmes surdimensionnés ou sous-dimensionnés génèrent une exploitation inefficace et, au fil du temps, des émissions indirectes importantes. Par conséquent, un dimensionnement correct du système pour la charge thermique du bâtiment s'avère indispensable afin de garantir une LCCP optimisée.

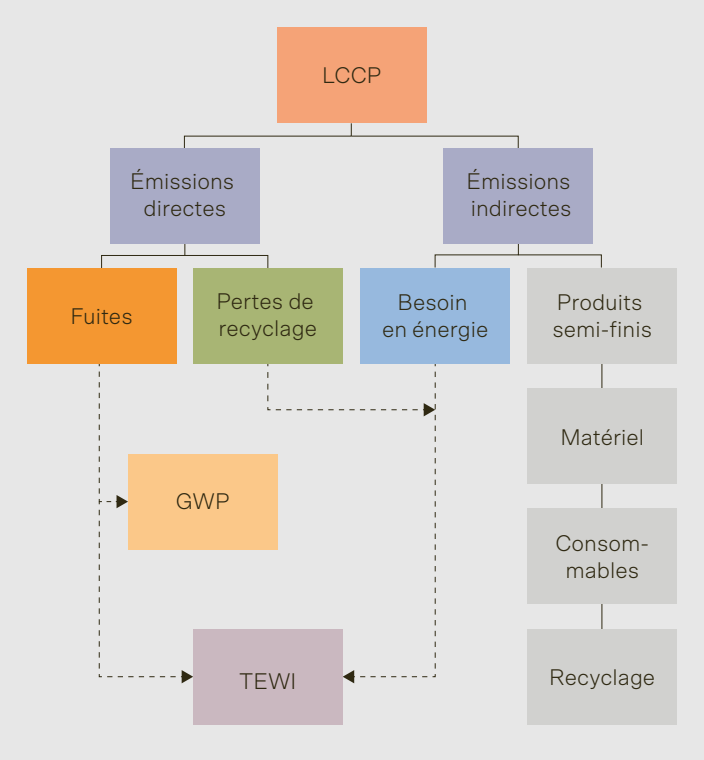


Illustration 3.7: Aspects pris en compte lors de la détermination de la Life Cycle Climate Performance. (Source: ASF)

3.8 Autres incidences environnementales: PFAS et TFA

Les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS), auxquelles appartient également l'acide trifluoroacétique (Trifluoroacetic Acid, TFA), deviennent un problème environnemental et sanitaire de taille dans le contexte des fluides frigorigènes. Les PFAS sont un groupe de produits chimiques synthétiques connus pour leur stabilité, leur résistance à la chaleur et leurs propriétés hydrofuges. En raison de telles caractéristiques, l'usage des PFAS est très répandu dans de nombreux produits du quotidien. Certains fluides frigorigènes, tels que les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrofluoroléfines (HFO), sont susceptibles de se décomposer en composés de PFAS lors de leur libération.
Ces PFAS sont souvent appelées «produits chimiques éternels», car ils ne se dégradent pas naturellement au fil du temps. En outre, elles sont également associées à des répercussions négatives sur la santé. Ces produits chimiques sont bioaccumulables. Autrement dit, ils s'accumulent dans les organismes vivants au fil du temps, ce qui entraîne des risques sanitaires sur le long terme. C'est la raison pour laquelle les gouvernements, les autorités environnementales et notamment l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (Environmental Protection Agency, EPA) et l'Union européenne restreignent de plus en plus l'usage des PFAS et fixent des valeurs limites pour leurs concentrations dans l'air, dans l'eau et dans les produits de consommation.
Le TFA (acide trifluoroacétique) est un acide carboxylique perfluoré à chaîne courte qui constitue un produit de dégradation de certains HFC et HFO comme le R1234yf, le R134a et le R125. Le TFA se forme dans l'atmosphère lorsque ces fluides frigorigènes se dégradent, et ce, notamment à travers l'interaction du rayonnement ultraviolet et des processus atmosphériques. Le TFA se distingue par sa bonne solubilité dans l'eau et il peut s'accumuler en milieu aérien et souterrain, dans des étendues d'eau, des océans et des sols. Sa longévité signifie qu'il est bioaccumulable dans des systèmes aquatiques. Au contraire des produits chimiques PFAS à chaîne longue, le TFA à chaîne courte ne s'accumule pas dans le corps dans les mêmes proportions. Toutefois, le TFA constitue une problématique environnementale en raison de sa capacité à polluer l'eau potable et les écosystèmes.
Le choix d'un fluide frigorigène naturel permet d'éviter la formation de PFAS. À titre d'exemple, le remplacement des HFC et des HFO par des fluides frigorigènes non fluorés comme les fluides frigorigènes naturels (ammoniac, dioxyde de carbone, propane) n'entraîne aucun accroissement de la quantité de produits chimiques PFAS dans l'environnement.

3.9 Conditions-cadres légales et évolutions

Conformément aux accords internationaux ratifiés, la Suisse s'est engagée à réduire sa consommation d'hydrofluorocarbures (HFC) partiellement halogénés à 15 % de sa valeur de référence (consommation moyenne de 2011 à 2013) d'ici 2036. Ce point concerne tout particulièrement le protocole de Montréal repris dans le droit fédéral (RS 0.814.021) et son cinquième amendement («amendement de Kigali», RS 0.814.021.5).
Les hydrofluorocarbures partiellement halogénés présentent un fort effet de serre et représentent la majorité des fluides frigorigènes stables dans l'air. En Europe, l'utilisation de fluides frigorigènes à fort GWP est régie par le règlement F-Gas du 7 février 2024 (règlement du Parlement européen et

du Conseil relatif aux gaz à effet de serre fluorés). Le règlement F-Gas n'est toutefois pas valable en Suisse. Ici, c'est un texte similaire qui s'applique, à savoir l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). La révision de l'ORRChim entrée en vigueur le 1er janvier 2025 concernant les fluides frigorigènes stables dans l'air a permis de garantir que des règles semblables s'appliquent à la fois en Suisse et dans l'Union européenne.
Les règlements relatifs à la mise sur le marché d'installations fonctionnant avec des fluides frigorigènes synthétiques sont également complétés par des interdictions spécifiques prévues dans le droit international applicable. Ainsi, plusieurs règlements plus stricts entreront progressivement en vigueur dans l'Union européenne d'ici 2035. Dans cet ordre d'idées, d'autres restrictions sont déjà prévues dans l'annexe 2.10 de l'ORRChim afin de respecter le calendrier défini pour la réduction de la consommation de HFC (2027, 2029, 2030, 2032, 2033, 3035) et de représenter l'état actuel de la technique. Entrée en vigueur le 1er janvier 2025, la modification de l'ordonnance tient compte des règlements qui s'appliquent également dans l'Union européenne à cette date.
Un livret d'entretien doit être tenu pour les installations dont la quantité de remplissage en fluide frigorigène dépasse les 3 kg. Le spécialiste qui effectue les travaux doit noter dans le livret d'entretien chaque intervention ou chaque entretien comme le remplissage de fluides frigorigènes. En cas d'utilisation de fluides frigorigènes appauvrissant la couche d'ozone ou stables dans l'air, l'installation doit être en outre annoncée aux autorités compétentes et des contrôles de l'étanchéité doivent être effectués régulièrement. Ces règles s'appliquent à toutes les installations dont la quantité de remplissage dépasse les 3 kg et aux installations contenant plus de 5 tonnes d'équivalents CO_2 de fluides frigorigènes stables dans l'air. L'obligation de contrôle d'étanchéité pour les installations fonctionnant aux HFO a également été adaptée.
Une fois annoncée, l'installation reçoit une vignette à apposer sur l'appareil qui permettra de l'identifier. Afin de proposer un point de contact pour des informations complémentaires et des modèles pour un livret d'entretien, ce document renvoie à la page Web de l'OFEV «Communication des installations contenant des fluides frigorigènes» (https://bit.ly/M_BAFU_f) ou au bureau de communication mandaté à cette fin.
Les fluides frigorigènes appauvrissant la couche d'ozone sont complètement

Quand une pompe à chaleur est-elle «mise sur le marché» en Suisse?
L'expression «mettre sur le marché» signifie «mettre à disposition de tiers» ou «remettre à des tiers» de même que l'importation à des fins professionnelles ou commerciales (ORRChim, art. 4, al. 1, let. i). Concrètement, cela signifie que la remise d'une pompe à chaleur à un client final est également considérée comme une «mise sur le marché». Les pompes à chaleur concernées par les interdictions de mise sur le marché ne peuvent donc plus être livrées à des clients finaux après la date limite déterminante de l'interdiction de mise sur le marché.
La définition de la notion de «mise sur le marché» peut être différente dans le droit des produits chimiques (ORRChim) et le droit de l'énergie (OEEE, etc.). Pour les fluides frigorigènes, c'est l'ORRChim qui est déterminante, article 4, alinéa 1, lettre i. Selon la définition de l'ORRChim, la vente d'une pompe à chaleur à un client final est également considérée comme une «mise sur le marché». Concrètement, cela signifie que les installations mono-split avec < 3 kg de fluide frigorigène et un GWP ≥ 750 ne pourront plus être vendues à partir du 1er janvier 2025.

interdits en Suisse depuis quelques années, et ce, même pour le remplissage en cas de fuite sur des installations existantes. Toutefois, l'exploitation d'une installation étanche n'est pas interdite. Par ailleurs, l'utilisation de fluides frigorigènes stables dans l'air n'est encore possible que de manière limitée. À titre d'exemple, les pompes à chaleur pour le confort utilisant le fluide R134a autrefois très répandu (un HFC) et dotées d'une puissance d'évaporateur supérieure à 600 kW ne peuvent plus être mises sur le marché. La puissance maximale sera réduite à compter de 2027.
Une synthèse graphique des règlementations relatives à la mise sur le marché et au remplissage d'installations stationnaires contenant des fluides frigorigènes peut être téléchargée sur la page Web de l'OFEV «Fluides frigorigènes» (https://bit.ly/OFEV_FF).
Par conséquent, un passage à des substances à faible GWP est opéré ces dernières années. En se basant sur les installations de climatisation des automobiles, différentes alternatives ont été étudiées de près, parmi lesquelles le fluide frigorigène HFO R1234yf et les mélanges qui en découlent. La faible stabilité du R1234yf a toutefois engendré des avis controversés quant à sa facilité d'utilisation. Par ailleurs, on ne dispose pas encore d'un recul suffisant avec ces substances. Une liste des fluides frigorigènes les plus importants qui sont utilisés dans des pompes à chaleur est mentionnée dans le Tableau 3.1.
À l'heure actuelle, le marché des pompes à chaleur repose en majeure partie sur des produits de série qui sont fabriqués à l'étranger pour l'ensemble de l'espace européen avant d'être importés en Suisse et d'être distribués aux clients finaux dans des configurations par défaut. Dans ce contexte, l'adaptation du cadre réglementaire a lancé une tendance à opter pour des fluides frigorigènes naturels auprès des fabricants de pompes à chaleur. Alors qu'une large gamme de pompes à chaleur à fluides frigorigènes naturels installées en extérieur est déjà disponible sur le marché pour les maisons individuelles et à deux logements, la branche conçoit encore des pompes à chaleur à fluides frigorigènes naturels sûres, efficaces et destinées à d'autres domaines d'application, tels que l'installation en intérieur.
Les appareils bi-bloc contenant moins de 3 kg de fluide frigorigène et présentant un GWP ≥ 750 ne peuvent plus être mis sur le marché depuis la révision de l'ORRChim entrée en vigueur le 1er janvier 2025 comme c'est le cas dans l'UE. Cette interdiction se justifie par le fait que d'autres appareils à fluides frigorigènes naturels sont déjà disponibles sur le marché pour ces domaines d'application.

Illustration 3.8: Limitations pour les pompes à chaleur fonctionnant avec des fluides frigorigènes stables dans l'air. (Source: Synthèse graphique des limitations pour les pompes à chaleur selon l'ORRChim, état: 31.12.2025)

<table>
<tr><th>Interdiction à partir du 1.12.2027</th><th colspan="3">Puissance calorifique</th><th>Fluide frigorigène/ GWP</th></tr>
<tr><th>Type de construction</th><th><12 kW</th><th>>12 kW à 50 kW</th><th>>50 kW à 250 kW</th><th></th></tr>
<tr><td>Mono-Split-L/W</td><td colspan="3">Non autorisé avec moins de 3 kg de fluide frigorigène</td><td rowspan="3">HFC
R134a, R407c, R410a
>750 et < 2100</td></tr>
<tr><td>Split-L/W</td><td>Non autorisé</td><td colspan="2">Admissible jusqu'au 1er janvier 2029</td></tr>
<tr><td>Monobloc</td><td colspan="2">Non autorisé</td><td>Admissible jusqu'au 1er janvier 2030</td></tr>
<tr><td>Split-L/W</td><td>Non autorisé</td><td colspan="2">Autorisé environ jusqu'au 1er janvier 2033</td><td rowspan="2">HFC/HFO
R32, R452b, R454b
>150 et < 750</td></tr>
<tr><td>Monobloc</td><td colspan="2">Non autorisé</td><td>Zulässig bis 1.1.2030</td></tr>
<tr><td>Split-L/W</td><td>Autorisé environ jusqu'au 1er janvier 2035</td><td colspan="2">Autorisé (aucune date d'interdiction connue)</td><td rowspan="2">HFO
R454c
<150</td></tr>
<tr><td>Monobloc</td><td>Autorisé environ jusqu'au 1er janvier 2032</td><td colspan="2">Autorisé (aucune date d'interdiction connue)</td></tr>
</table>

À l'heure actuelle, les appareils d'une puissance frigorifique supérieure à 600 kW ne peuvent être mis sur le marché suisse qu'avec des fluides frigorigènes non stables dans l'air. Conformément à la nouvelle consultation de l'ORRChim encore en cours, cette règle s'appliquera à des puissances frigorifiques inférieures (200 kW par exemple) à compter du 1er janvier 2027; la valeur exacte n'était pas encore connue au moment de la mise à l'impression de ce livre. Dans ce contexte, les domaines d'application avec des puissances frigorifiques allant par exemple jusqu'à 200 kW seront réglementés d'une façon analogue à celle prévue par le règlement F-Gas et ils pourront bénéficier de délais transitoires prolongés. En outre, les autorités peuvent octroyer des dérogations si l'état de la technique ne permet pas de respecter les exigences spécifiées dans les versions actuellement en vigueur des normes SN EN 378-1, -2 et -3, IEC 603356-2-89 et IEC 60335-2-40 sans utiliser un fluide frigorigène stable dans l'air. Cette disposition sera également modifiée à compter de 2027. En effet, des exceptions directement applicables remplaceront les dérogations évoquées précédemment.
Ces adaptations juridiques sont nécessaires afin d'atteindre l'objectif de réduction fixé pour les fluides frigorigènes stables dans l'air. L'industrie, les associations professionnelles, les planificateurs et les installateurs sont conscients des défis à relever dans le domaine des fluides frigorigènes naturels. Désormais, il convient de continuer à accorder la priorité au passage des énergies fossiles aux énergies renouvelables avec conviction et en coopération

Exemples d'interdiction de mise sur le marché

1. Le fabricant A d'Europe livre le 20.12.yyyy de la marchandise à sa filiale générale en Suisse. Cette marchandise est maintenant à la disposition des installateurs après l'entrée en vigueur de l'interdiction. Cette marchandise est mise en circulation une première fois avec son importation en Suisse. Toutefois, la remise (remise physique) à l'installateur constitue à nouveau une mise sur le marché et tombe sous le coup des règles applicables au moment de la remise, c'est-à-dire, dans cet exemple, de l'interdiction.
2. L'installateur X prend en réserve le 20.12.yyyy, par sécurité, 10 pompes à chaleur avec du R410A pour qu'il puisse encore les installer après l'interdiction. Il a reçu des promesses orales de clients finaux selon lesquelles ils souhaitent commander ces appareils dans les 6 mois à venir. Cela n'est pas autorisé, car la remise au client final (mise sur le marché) n'aura lieu qu'après l'entrée en vigueur de l'interdiction.
3. Le client final fait livrer et facturer une pompe à chaleur chez lui le 31.12.yyyy, afin de pouvoir encore l'installer après l'interdiction en automne de l'année suivante. Cela est autorisé. L'installation est considérée comme mise en circulation par la remise au client final, même si la facture n'a pas encore été établie.
4. Le fabricant B construit en Suisse une installation sur mesure pour un client en Suisse. L'installation est certes payée, mais il ne peut malheureusement pas livrer l'installation avant le 31.12.yyyy, car il lui manque encore des composants. Il ne pourrait livrer et installer le produit au client final que trois mois après l'entrée en vigueur de l'interdiction. Cela n'est pas autorisé, car la mise sur le marché n'aura lieu que lors de la remise physique après l'entrée en vigueur de l'interdiction. (Source: ImmoClimat Suisse, Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur)

avec l'OFEV. Chaque pompe à chaleur supplémentaire qui remplace un chauffage à énergie fossile constitue incontestablement une valeur ajoutée pour la protection du climat, et ce, quel que soit son fluide frigorigène. Ainsi, d'après une estimation, une pompe à chaleur installée dans une maison individuelle classique permet d'économiser en moyenne 4 tonnes de CO_2 par an par rapport à une chaudière fonctionnant au gaz naturel.

3.10 Informations complémentaires

- Office fédéral de l'environnement: pages Web consacrées aux thèmes des «fluides frigorigènes» et à la «communication des installations contenant des fluides frigorigènes»
- Office fédéral de l'environnement: aides à l'exécution «Installations contenant des fluides frigorigènes: du concept à la mise sur le marché», 2022 et «Installations et appareils contenant des fluides frigorigènes: exploitation et entretien», 2022
- SuisseEnergie: «Guide des fluides frigorigènes pour les spécialistes en chauffage, ventilation et climatisation», édition 10/2020
- ImmoClimat Suisse, Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur: fiche d'information «Réfrigérants naturels», mars 2024; fiche d'information «État de la technique des réfrigérants», mars 2024
- ImmoClimat Suisse, Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur: FAQ «Fluides frigorigènes dans des pompes à chaleur: lequel utiliser et à quoi faut-il faire attention?, septembre 2024
- suissetec: notice technique «Pompes à chaleur et installations de réfrigération contenant des fluides frigorigènes inflammables faiblement toxiques», décembre 2024
- Association Suisse du Froid: aide-mémoire «Pompes à chaleur et installations de réfrigération contenant des fluides frigorigènes inflammables faiblement toxiques de la classe de sécurité A3 et A2L», juillet 2025

Chapitre 4

Sources de chaleur

Les types de sources de chaleur suivants peuvent être utilisés avec des pompes à chaleur:
- Air extérieur
- Géothermie
- Eaux souterraines et de surface
- Rejets thermiques
- Refroidissement de bâtiments

En principe, plus le niveau de température de la source de chaleur est bas, moins bonne est l'efficience (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. La faible capacité thermique de l'air – par rapport à la saumure et à l'eau – représente toutefois un inconvénient: par comparaison, elle exige des débits volumiques élevés dans l'évaporateur. Il arrive également que du condensat gelé se forme sur l'évaporateur (en cas d'air extérieur frais et humide) et qu'un dégivrage régulier soit nécessaire. Par ailleurs, il faut noter que la température de la source de chaleur est opposée à la température du système de chauffage requise. Lorsque les températures extérieures sont en hausse, la puissance de chauffage de l'appareil augmente. La mise en cascade ou la régulation de la vitesse de régulation des compresseurs peuvent contrecarrer cet effet (Illustration 4.1). Le transport de l'air par le biais du ventilateur peut engendrer des émissions sonores gênantes. C'est la raison pour laquelle les autorités communales d'attribution des permis de construire exigent généralement un certificat de protection contre le bruit (chap. 8).

Systèmes

On distingue les modèles suivants:
- **Installation compacte pour le placement en intérieur:** L'installation compacte destinée à un placement en intérieur est en règle générale dédiée à des installations de petite et de moyenne taille (puissance de chauffe: 5 kW à 50 kW).
- **Installation compacte pour le placement en extérieur:** L'installation compacte destinée à un placement en extérieur est privilégiée lorsque aucune place n'est disponible à l'intérieur du bâtiment (ou s'il est souhaité par le maître d'ouvrage).
- **Installation à éléments séparés:** Les installations à éléments séparés sont utilisées dans le cas où l'air extérieur, en raison du débit volumique d'air re-

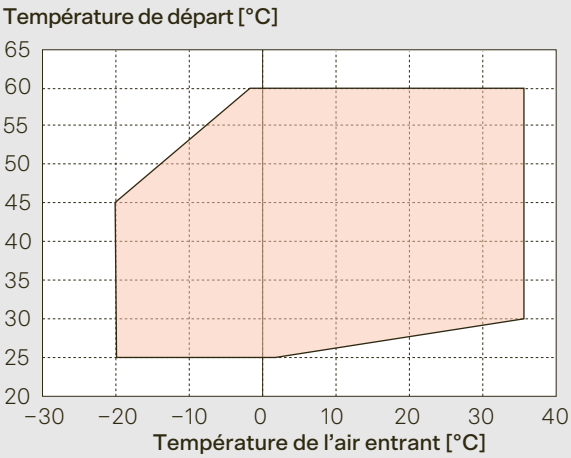


Illustration 4.1: Exemple des limites d'utilisation d'une pompe à chaleur air-eau (en haut). Lors de température d'air entrant basses, seules de basses températures de départ peuvent encore être atteintes. En bas: Charge du bâtiment et puissance de chauffage (PAC régulée en fonction de la charge). Lors de températures extérieures basses, il faut donc couvrir la charge avec un chauffage d'appoint. Attention: Selon la loi, la pompe à chaleur doit pouvoir couvrir à elle seule les besoins jusqu'à la température de dimensionnement.

quis, ne peut être acheminé directement jusqu'au module placé dans le bâtiment. La partie évaporateur est disposée à l'extérieur tandis que le condenseur se trouve dans le bâtiment Le compresseur peut être installé dans l'unité intérieure ou extérieure.

Indications pour la planification

L'utilisation d'air extérieur en tant que source de chaleur n'est en principe pas sujette à autorisation. Le raccordement électrique doit toutefois être autorisé par le fournisseur d'électricité compétent. Il convient également de respecter les exigences des procédures cantonales et communales d'autorisation de construire, en particulier en ce qui concerne la protection contre le bruit.

- La température du système de chauffage peut être limitée, en raison de la température parfois basse de la source (Illustration 4.1).
- Conformément à la loi (MoPEC), les pompes à chaleur doivent être dimensionnées de façon à couvrir l'ensemble de la plage de fonctionnement.
- 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 nécessaire. Il convient de respecter les instructions spécifiques aux appareils.
- 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. Ceci s'applique également à la tuyauterie de l'évaporateur.
- 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). Il existe en outre le risque de formation d'une strate d'air froid.
- 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, centrales techniques etc.) 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. À l'inverse, il y a lieu de protéger les personnes des éléments mobiles (ventilateurs, condenseurs et pompes, y c. leurs raccords électriques).
- Une installation fixe d'appareils extérieurs requiert un permis de construire.



Illustration 4.2: Installation compacte pour le placement à l'intérieur. (Source: BKW SA)



Illustration 4.3: Installation compacte pour le placement à l'extérieur. (Source: BKW SA)



Illustration 4.4: Sonde géothermique. (Source: BKW SA)

– 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 8).

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. L'exploitation de la chaleur terrestre est sujette à autorisation. La norme SIA 384/6 «Sondes géothermiques» fournit les bases pour le dimensionnement et l'intégration.



Illustration 4.5: Pieu foré. (Source: enercret Röthis)

Sondes géothermiques (SGV)

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. Ceux-ci peuvent être formés d'un seul tube en U (Simplex), de deux tubes en U (Duplex) ou en exécution coaxiale. En raison de leur efficience (grande surface de transmission de chaleur) et de leur faci-



Illustration 4.6: Pieu enfoncé. (Source: enercret Röthis)



Illustration 4.7: Corbeille d'armature du pieu avec sondes fixées. (Source: HakaGerodur)

lité de maniement, l'agencement avec deux tubes en U (Duplex) 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 le contact entre les tuyaux de la sonde et le terrain.

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

- Puissance de transmission de la sonde (prélèvement ou injection)
- Besoin d'énergie: Volume et durée du prélèvement de chaleur et de l'éventuelle réinjection (régénération, refroidissement) au cours de l'année
- Géologie du sous-sol: Température, conductibilité thermique, densité, capacité thermique, présence d'eaux souterraines etc.
- Nombre de sondes avec capacité thermique du remblai
- Longueur et profondeur des sondes
- Distance entre les sondes
- Diamètre du forage et des conduites
- Remplissage d'eau ou d'antigel, sans formation de glace
- Perte de charge du système

Indications pour la planification

- Pour connaître les sites où l'utilisation de la géothermie est autorisée, consulter les géoportails d'information (cartes d'utilisation de la géothermie) des cantons
- Les installations de sonde géothermique sont réalisées par des entreprises de forage agréées et sont toujours soumises à autorisation (compétence cantonale). Le GSP remet un certificat de qualité pour les entreprises de forage de sondes géothermiques verticales, dont il est recommandé de tenir compte. Ceci est obligatoire pour le label de qualité PAC Système-Module (chap. 9.2).
- Le dimensionnement doit être effectué conformément à la norme SIA 384/6 qui prévoit un procédé simplifié pour les installations simples comptant jusqu'à quatre sondes. Principe: plus le champ de sondes géothermiques est grand, plus le prélèvement de chaleur possible à long terme par mètre de sonde est faible. Il convient également de tenir compte des sondes voisines pas entièrement régénérées.
- Si l'installation de sonde géothermique est utilisée en tant que «source de froid» à des fins de refroidissement (freecooling), le sol peut être partiellement «régénéré» par l'apport de chaleur. Les conséquences de la régénération sur le dimensionnement de la sonde géothermique doivent être établies par un spécialiste reconnu et simulées à l'aide d'un outil logiciel adapté.
- Les installations de sonde géothermique ne doivent pas être utilisées pour la déshumidification des constructions, car les conditions-cadres mentionnées ne sont généralement pas respectées.

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

Diamètre des sondes géothermiques	Contenu par mètre	Diamètre 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	supérieur à 300 m**

* Il faut utiliser des diamètres plus grands (4¾" à 7⅝") 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.
** À partir d'env. 250 m, il faut utiliser des sondes géothermiques présentant une résistance plus élevée à la pression.

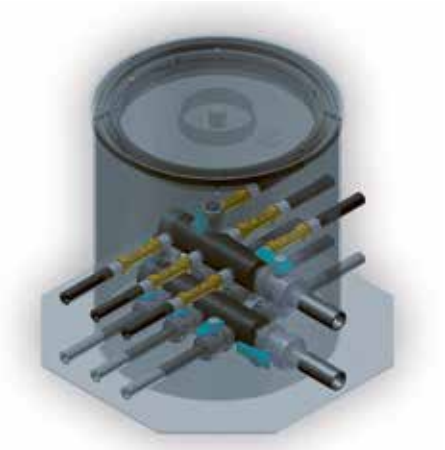


Illustration 4.8: Distribution externe praticable. (Source: Jansen AG)

- L'accès de l'appareil de forage au lieu de forage doit être garanti.
- Les remarques relatives à la géométrie des sondes terrestres figurent dans le Tableau 4.1.
- Les conduites de raccordement des sondes géothermiques sont réunies dans un distributeur, qui peut être situé à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment (attention à la protection antigel: isolation thermique ou remplissage des conduites avec de l'antigel). L'Illustration 4.8 présente un distributeur externe accessible.
- Le distributeur doit être accessible tout au long de sa durée de vie. Il est nécessaire d'identifier les sondes géothermiques raccordées et leur point de raccordement sur le distributeur. En cas d'installations dotées de deux sondes ou plus, il convient d'installer et de régler des vannes de régulation du débit volumique.
- Concevoir les sondes géothermiques à long terme et s'assurer d'un dimensionnement suffisant (réserve en cas de remplacement de la pompe à chaleur par un appareil de meilleure efficacité).

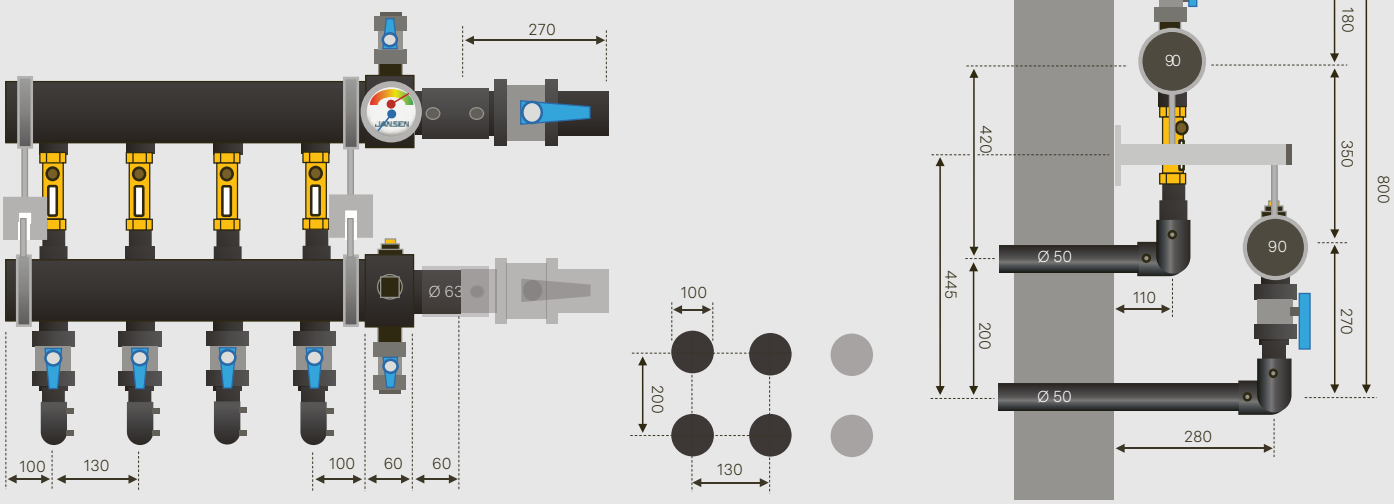
Illustration 4.9: Exemple d'un distributeur. (Source: Jansen AG)

Sonde géothermique avec technique au CO_2

En variante à la sonde géothermique avec remplissage eau ou eau/glycol, la sonde peut également fonctionner avec du CO_2. La sonde au CO_2 fonctionne selon le principe du caloduc (heat pipe). Du CO_2 (dioxyde de carbone) non toxique circule dans la sonde géothermique. Le CO_2 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



Illustration 4.10: Nouvelle installation d'un registre géothermique. Il est ensuite à nouveau recouvert de terre. (Source: Haka-Gerodur)



Vue frontale

Gabarit de trous des carottages pour les conduites saumure

Vue latérale



1 Solidement soudé: Toutes les conduites sont solidement soudées avec la paroi du puits et garantissent une étanchéité absolue.



2 Couverture de puits de grande valeur: Couvercle en matière synthétique PE, résistant aux UV, étanche à l'eau de ruissellement, en exécution robuste.



3 Robuste et fonctionnel: Fabriqué en plaques PE d'une épaisseur jusqu'à 12 mm. Satisfait aux exigences statiques élevées. Œillets solides pour l'arrimage, le transport et l'intégration.



4 Conduite principale verrouillable: Selon le type de puits, soit avec un robinet sphérique ou un clapet verrouillable; pour une installation correcte et un fonctionnement optimal.



5 Conduites saumure et affichages de débit: Toutes les conduites saumure sont verrouillables. Les affichages de débit sont fixés au moyen d'écrous d'accouplement 1¼" et permettant ainsi une maintenance aisée si besoin.



6 Raccord de rinçage: Les raccords de rinçage 1" sont verrouillables et permettent un rinçage et un remplissage rapide de l'installation.

Illustration 4.11: Distributeur complet. (Source: Jansen AG)

chaleur du sol à la pompe à chaleur. Le CO_2 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 serpentins 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 règle générale, on utilise un mélange antigel en tant que fluide frigorigène.

Systèmes
Les registres géothermiques sont en règle générale des tuyaux en matière synthétique ou des 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 à 30 W ou à environ 60 kWh pendant la période de chauffage. En cas de sol défavorable (sec), les valeurs se situent entre 10 et 15 W/m².
- 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).
- Selon la saison, les registres de sondes géothermiques peuvent déclencher des mouvements de terrain s'ils givrent.

Pieux énergétiques
Les pieux énergétiques sont généralement 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 règle générale, on utilise un mélange antigel en tant que fluide caloporteur.

Systèmes
On différencie deux types de conceptions:
- 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.



Illustration 4.12: Corbeilles géothermiques. (Source: Calmotherm)

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.
- 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 frigorigène 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 (Illustration 4.12). Tout comme les registres géothermiques, elles sont influencées par les conditions météorologiques à la surface du sol.

Tranchée géothermiques
Des tuyaux en matière synthétique sont posés horizontalement dans des puits profonds de 1 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 frigorigène
En général, les systèmes d'exploitation de l'énergie géothermique fonctionnent avec un mélange antigel. 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 antigel doit correspondre aux prescriptions du fabricant (protection anticorrosion). Les propriétés physiques du mélange antigel varient selon la température et la capacité thermique.

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.

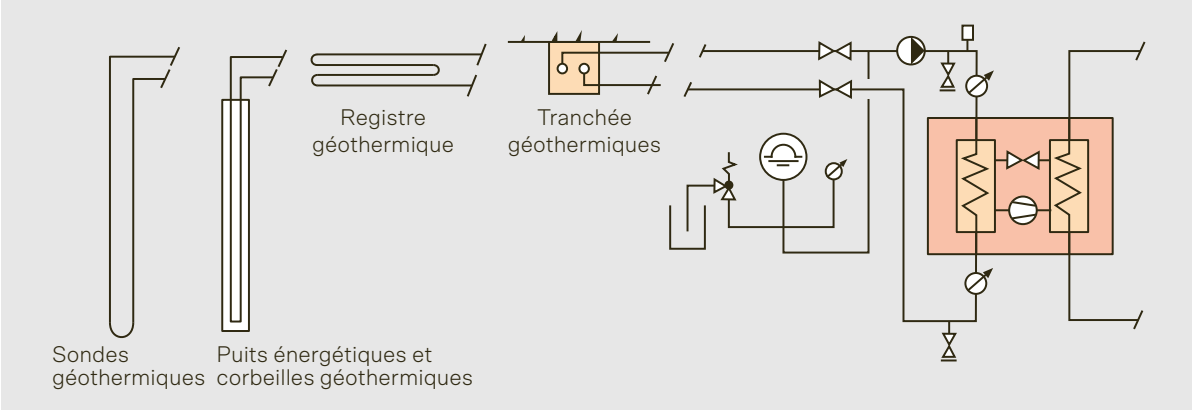


Illustration 4.13: Intégration à un système d'exploitation de l'énergie géothermique.

Un circulateur surdimensionné ou sous-dimensionné peut faire chuter drastiquement 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 de suintement 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.

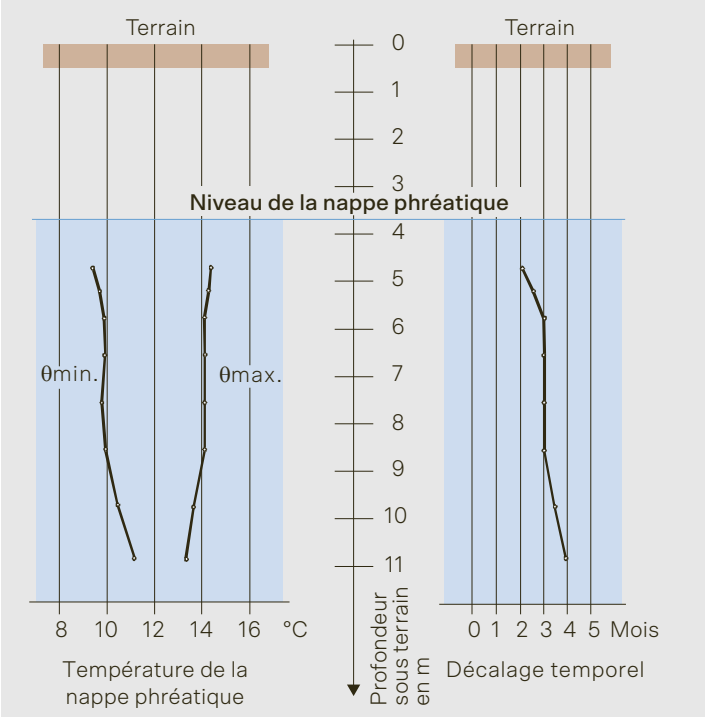
Systèmes de tuyaux

- Il convient d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion tels que la matière synthétique, l'acier chromé (V4A) ou l'acier traité anticorrosion. Aucun tuyau ou raccord galvanisé ne doit être utilisé.
- À 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 tout suintement d'eau.

Équilibrage 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.

Illustration 4.14: Températures de la nappe phréatique.

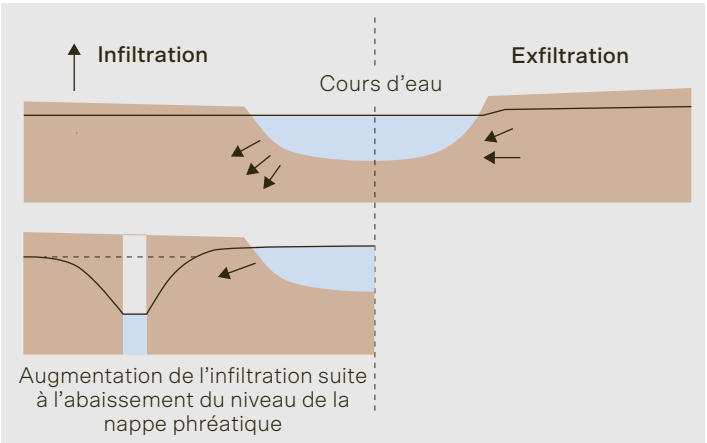


4.3 Eau souterraine

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 proche de la surface est la plupart du temps exploitée à partir de profondeurs comprises entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres,

Illustration 4.15: Infiltration des eaux de surface.



principalement à partir de gisements de roche meuble riche en gravier. L'eau souterraine proche de la surface peut également être utilisée comme eau potable. Son utilisation est dès lors réglementée par les lois sur la protection des eaux souterraines et toujours soumise à autorisation ou à concession. La température annuelle moyenne de l'eau souterraine proche de la surface est en règle générale comprise entre 9 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 (Illustration 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. Elle peut également être utilisée pour refroidir. Les bases de dimensionnement sont fixées dans la norme SIA 384/7:2010 «Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine».

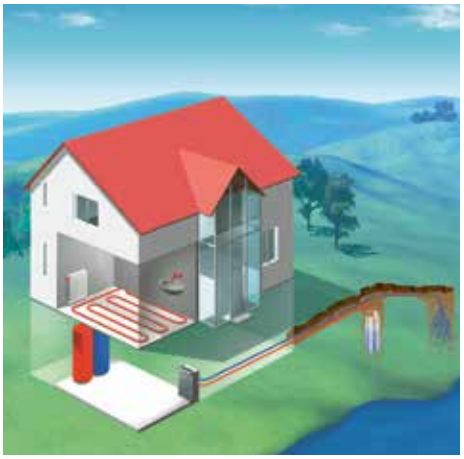
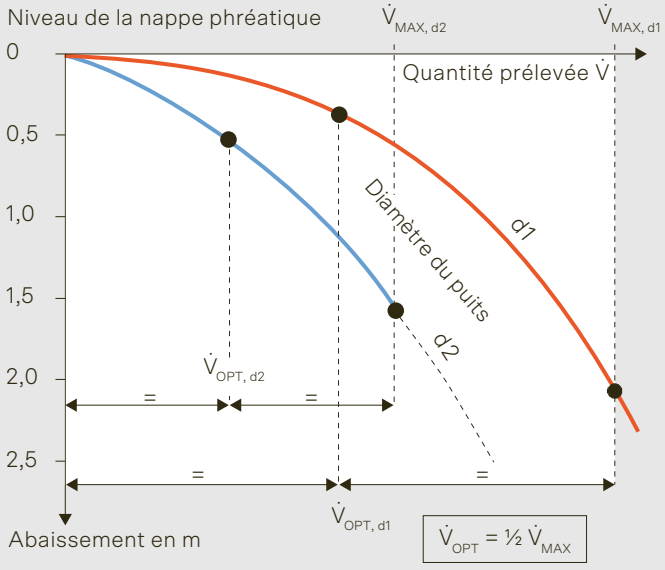


Illustration 4.16: Puits de prélèvement et de restitution. (Source: BKW SA)



$\dot{V}_{MAX}$ = Quantité maximale de prélèvement après un essai de pompage prolongé
$\dot{V}_{OPT}$ = Quantité optimale de prélèvement pour les PAC

Illustration 4.17: Deux exemples pour le dimensionnement d'un prélèvement d'eau souterraine.

Qualité de l'eau souterraine

La qualité de l'eau souterraine peut être influencée de manière décisive par l'infiltration des eaux de surface (Illustration 4.15). 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): ≤ 0,15 mg/l
- Manganèse (dissous): ≤ 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 prélèvement ainsi que le puits de restitution doivent être planifiés et réalisés sous le contrôle d'un spécialiste

qualifié. Par conséquent, il est important de procéder à un désablage professionnel avant l'achèvement et la mise en service du puits.

Prélèvement et restitution de l'eau souterraine

Le dimensionnement du puits de prélèvement et de restitution (Illustration 4.16) 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 (Illustration 4.17). Le débit requis par kW de besoin calorifique est en règle générale compris entre 150 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

- Pour connaître les sites où l'exploitation de l'eau souterraine est autorisée, consulter les géoportails d'information (cartes de la protection des eaux et d'utilisation de la chaleur) des cantons
- Une autorisation officielle est nécessaire à l'exploitation de l'eau souterraine. Cela concerne également les forages d'essai. La pratique en matière d'autorisation diffère d'un canton à

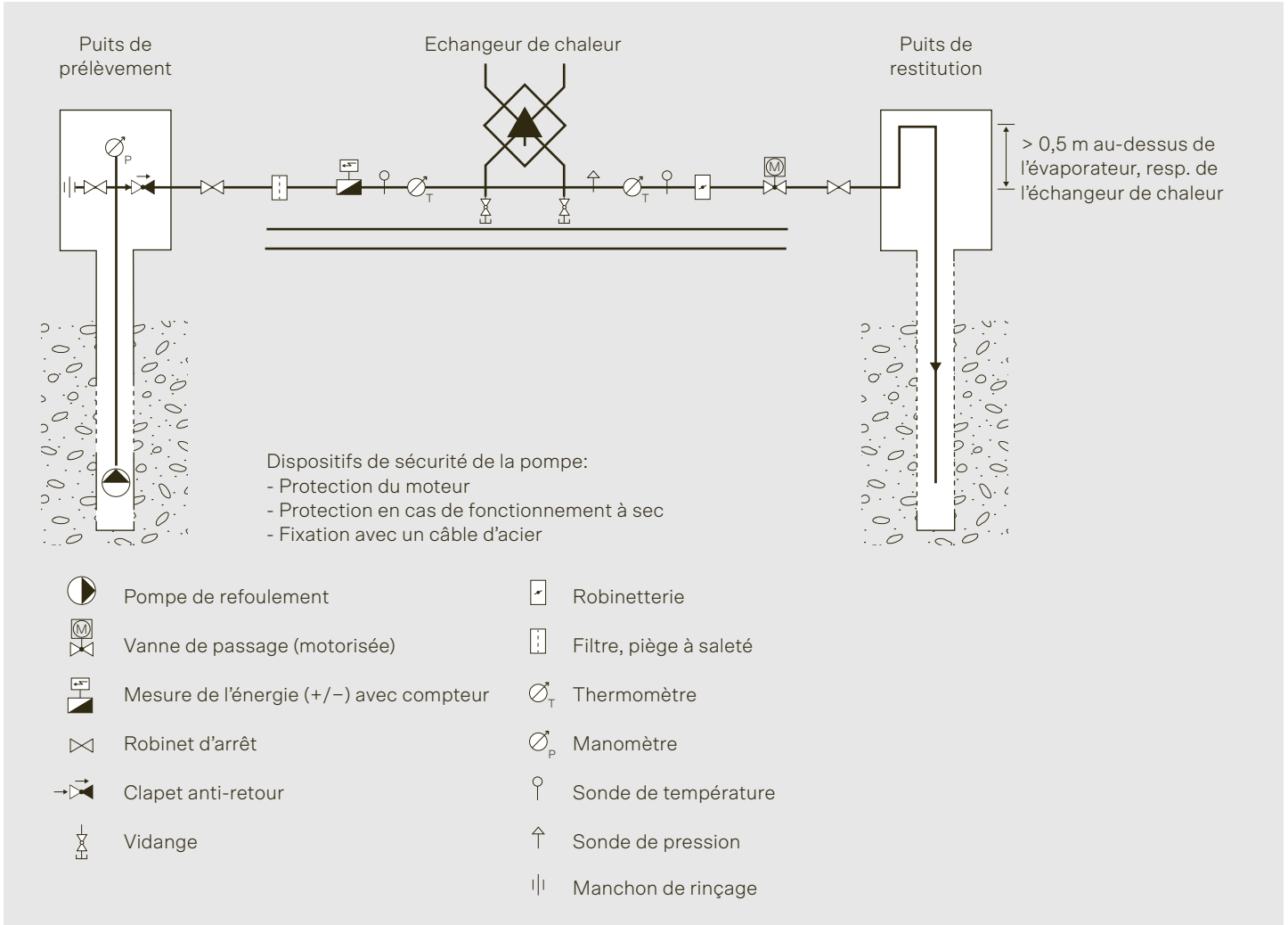
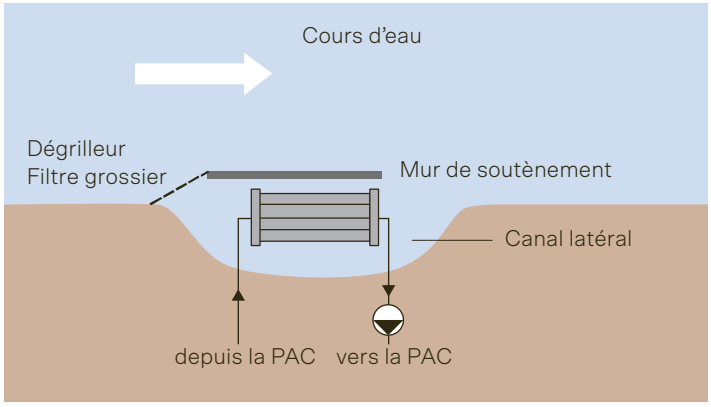


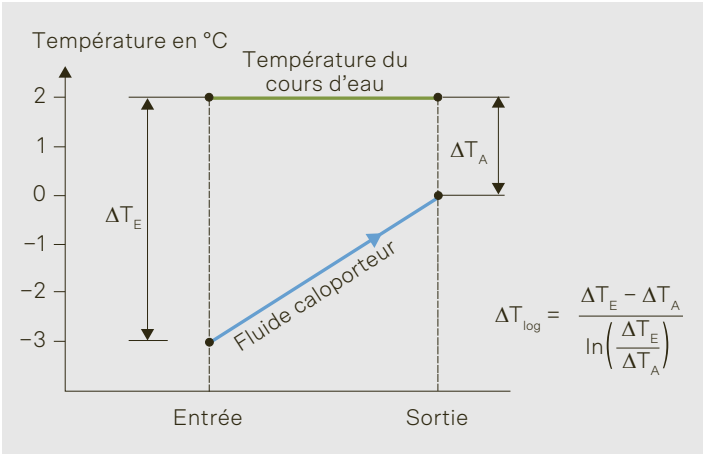
Illustration 4.18: Aperçu des composants du système (Source: Norme SIA 384/7). Remarque: symboles selon SIA 410.

l'autre. Des surveillances du niveau et de la température de l'eau souterraine dans le puits sont fréquemment demandées. Par exemple, des capteurs de pression et de température spéciaux doivent être descendus avec la pompe d'eaux souterraines.
- La planification et la mise en œuvre doivent être effectuées avec l'aval d'un géologue ou d'un hydrogéologue conseil.
- Une simple analyse de l'eau est recommandée. Il faut toutefois prendre en compte que la qualité de l'eau peut être soumise à des variations saisonnières. Il convient de faire attention aux matériaux des conduites et des composants (corrosion et encrassement).
- 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).
- 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 re-

Illustration 4.19: Registre dans les eaux courantes.

Illustration 4.20: Définition de la différence de température logarithmique.





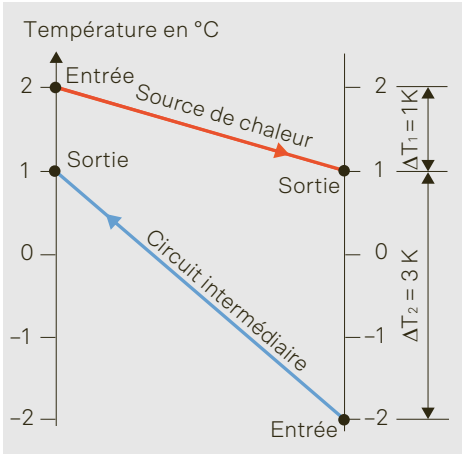


Illustration 4.21: Températures des sources de chaleur et du circuit intermédiaire.

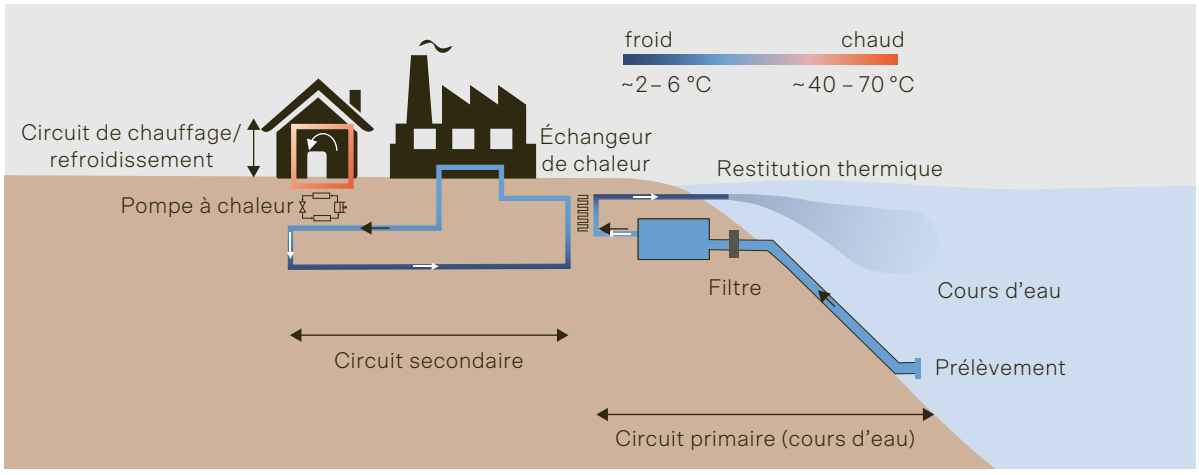


Illustration 4.22: Puits filtrants lors de l'exploitation de l'eau de lac. Dans l'exemple, le circuit secondaire est utilisé pour refroidir (processus industriel) et pour chauffer (bâtiments), l'eau de restitution est plus froide que l'eau de prélèvement. (Source: EAWAG 2018)

froidissement de l'eau exploitée en dessous du point de congélation, ainsi qu'une surexploitation du captage.
- En cas de pollution de l'eau souterraine, installer un circuit intermédiaire qui protège l'échangeur de chaleur de la pompe à chaleur.

Conformément à la norme SIA 384/7, le système d'installations complet doit comprendre les composants de système suivants (Illustration 4.18):
- Puits de prélèvement
- Système d'alimentation (pompe, manchons de rinçage, canalisations et échangeur de chaleur), pour conduire l'eau souterraine du puits de prélèvement à la restitution.
- Dispositifs de sécurité pour protéger la pompe de refoulement (marche à sec)
- Dispositifs de protection de l'échangeur de chaleur (contre la sollicitation mécanique ou chimique excessive)
- Restitution (puits ou infiltration)
- Dispositifs de surveillance de l'eau souterraine captée (quantité d'eau, température de l'eau au prélèvement et à la restitution)
- Dispositif de surveillance de l'eau souterraine (niveau de l'eau)

Eaux de surface

Les eaux de surface recèlent un potentiel considérable pour chauffer et refroidir les bâtiments situés à proximité, l'écosystème devant cependant être pris en compte. L'exploitation des eaux de surface est donc également soumise à autorisation et à concession, les interlocuteurs étant les cantons ou les communes. 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 sans risque en dessous de 0 °C. Le circuit intermédiaire souvent exigé également par les autorités protège aussi l'eau contre une contamination par le fluide frigorigène en cas de dommage.
Le prélèvement de chaleur à partir des eaux de surface est possible de deux manières:
- Registre dans les eaux courantes (Illustration 4.19): une très grande quantité d'eau s'écoule à travers le registre, le refroidissement est faible en conséquence (Illustration 4.20).
- Solution du puits de filtration (Illustration 4.22): 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 à 6 K (Illustration 4.20). Pour dimensionner la surface de l'échangeur de chaleur, on peut utiliser des coefficients U de 200 à 300 W/m² K (vitesse d'écoulement > 0,5 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 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 exempte d'impuretés. Un fonctionnement monovalent est souvent possible. Lors de l'utilisation de l'eau des lacs, il convient de faire attention à la stratification de sa température: le prélèvement doit être effectué à une profondeur d'au moins

15 m, à une profondeur supérieure (entre 30 et 70 m) pour l'exploitation du froid. La restitution ne doit pas réchauffer davantage les couches en surface.
Pour résumer, on peut dire que:
- Un circuit intermédiaire fournit des températures d'évaporation plus basses et ainsi des rendements moins bons (Illustration 4.21).
- L'apport en eau de rivière est souvent variable (en particulier dans le cas de petits ruisseaux).
- Dans les cours d'eau, il convient également de tenir compte de l'exploitation supérieure et inférieure (c.-à-d. dire en amont et en aval).
- Pour chaque kW de besoin calorifique, le besoin en eau est en règle générale compris entre environ 300 et 400 l/h.
- La réalisation est plutôt difficile (en particulier la solution du registre, les captages d'eaux lacustres sont relativement non problématiques).
- 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. Il faut toutefois prendre en compte que la qualité de l'eau peut être soumise à des variations saisonnières. Il faut veiller à la matérialisation des conduites et des composants (corrosion et encrassement).
- Il convient de prendre garde aux encrassements et obstructions dus aux moules zébrées ou à un biofilm.
- L'apport de chaleur estival est extrêmement délicat d'un point de vue écologique et n'est donc guère autorisé.

4.4 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 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'évi-

ter 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 1,5 à 2 kW/m^2.
– 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.
– Les échangeurs dans le canal de dérivation doivent être exempts de saleté et de corps étrangers (sable, pierres, vase).
– 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 COPA.
– De telles installations doivent être planifiées par des spécialistes expérimentés.
– Inclure dès le départ l'office compétent pour le domaine des eaux usées.
– Ne convient pas aux installations de petite taille.

Remarque: L'utilisation des rejets thermiques est également souvent prescrite en vertu de la loi. Cela ne concerne pas uniquement les eaux usées, la source de rejets thermiques peut également être le refroidissement en retour des installations frigorifiques par exemple.

4.5 Refroidissement de bâtiments

Normes et bases légales
Les bâtiments doivent être planifiés et réalisés de sorte que les exigences de confort prévues par la norme SIA 180 soient satisfaites sans refroidissement actif ou passif dans le cas d'utilisations avec des apports de chaleur spécifiques internes modérés. Cette exigence présuppose que les dispositifs de protection solaire mobiles soient utilisés correctement et ventilés en fonction des besoins. Les termes employés et les normes de référence sont représentés dans l'ordinogramme de la procédure de planification (Illustration 4.23, page suivante).
Dans le cas d'un refroidissement actif, la pompe à chaleur fonctionne comme une machine frigorifique d'après le principe inverse. En effet, les rôles du liquéfacteur et du condenseur sont inversés. Ce processus requiert une quantité d'énergie électrique supplémentaire pour le compresseur par rapport à un refroidissement passif.

Nécessité d'un refroidissement
La norme SIA 380/2 pose des exigences de construction en matière de protection thermique estivale, et ce, notamment en ce qui concerne la protection solaire, l'isolation thermique, la capacité de stockage thermique et la ventilation. Si ces conditions préalables sont remplies, un refroidissement des

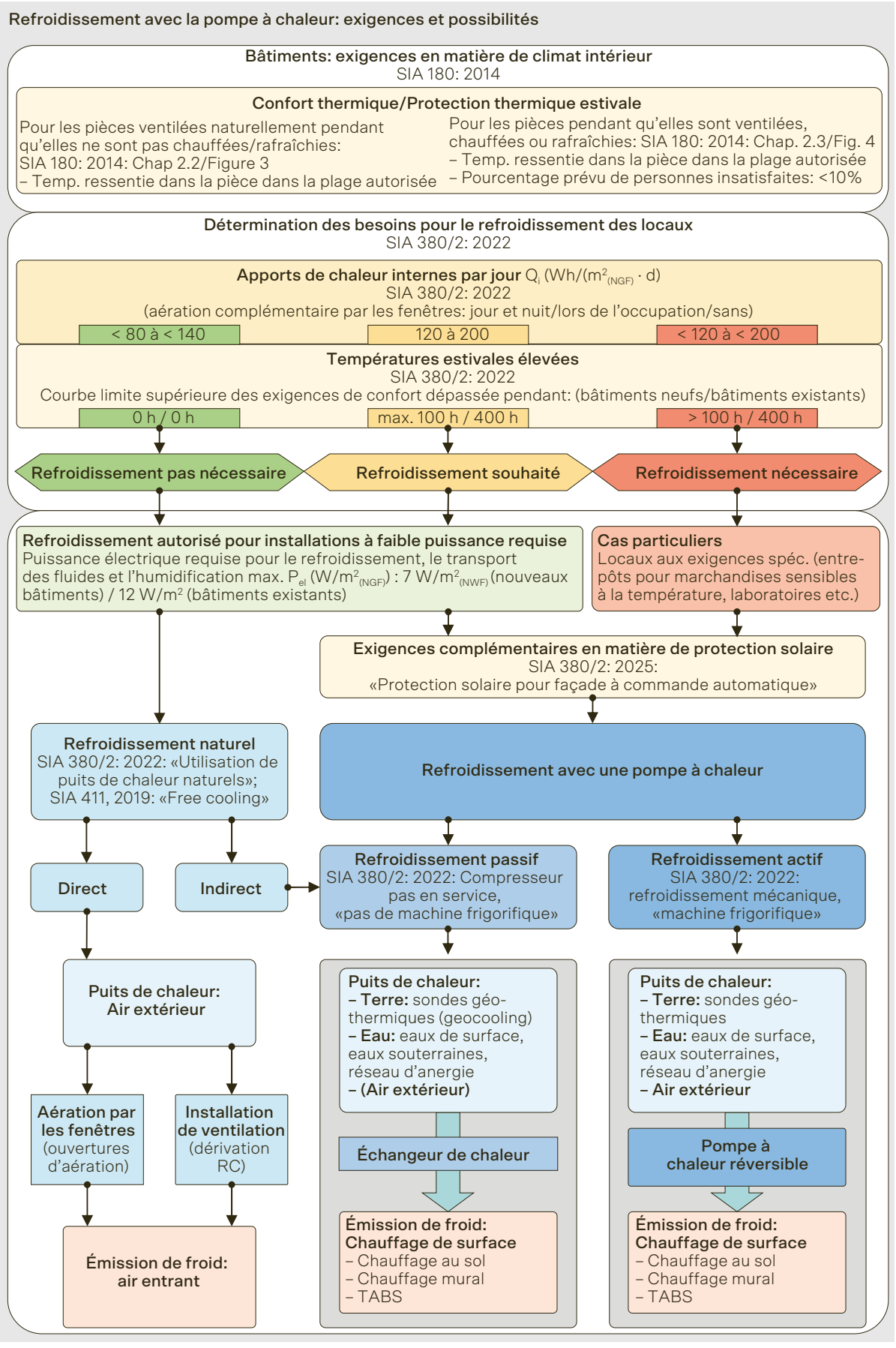


Illustration 4.23: Ordinogramme pour la planification du refroidissement avec des pompes à chaleur. (Source: Christoph Sibold, FHNW INEB)

bâtiments peut néanmoins s'avérer «nécessaire» ou tout du moins «souhaité». Un tel cas peut se présenter si les apports de chaleur internes produits par des personnes ou des appareils, éclairage inclus, nuisent au confort (Tableau 4.2). Par conséquent, il est toujours recommandé en premier lieu de maintenir les charges internes à leur niveau le plus bas possible.

Exigences légales

Dans le cas de l'utilisation d'un refroidissement actif, les exigences légales prévues par le MoPEC et les lois sur l'énergie des cantons concernés doivent être satisfaites. Ces exigences s'étendent de la protection thermique estivale (coefficient g des fenêtres, vitrage conforme à la norme SIA 180, protection solaire automatique pour façade, protection solaire résistante au vent) à l'utilisation des rejets thermiques dans la mesure où l'état de la technique et les conditions d'exploitation le permettent et pour autant que cela soit économiquement supportable. La preuve des besoins pour les installations de refroidissement, d'humidification et de déshumidification a été remplacée par des exigences techniques. Une vue d'ensemble des exigences légales est représentée dans l'Illustration 4.24.

Critère d'évaluation: valeur de consigne de la température ambiante pour le refroidissement

Une simulation thermique de la zone concernée permet de contrôler, à l'aide d'une procédure de justification, si un refroidissement est nécessaire au respect des conditions de confort. À cet égard, une corrélation est établie avec

Apports de chaleur internes par jour en Wh/m²			Refroidissement
avec aération par les fenêtres, jour et nuit	avec aération par les fenêtres, lors de l'occupation	sans aération par les fenêtres	
> 200 140 à 200 < 140	> 140 100 à 140 < 100	> 120 80 à 120 < 80	nécessaire souhaité* pas nécessaire*
* Seul un refroidissement minimal allant jusqu'à 7 W/m² max. de surface nette de plancher est autorisé. Dans le cas d'installations existantes ou de rénovations, cette valeur peut s'élever à 12 W/m².			

Tableau 4.2: Évaluation de la nécessité d'un refroidissement à l'aide des apports de chaleur par m² de surface nette de plancher. (Source: SIA 380/2)

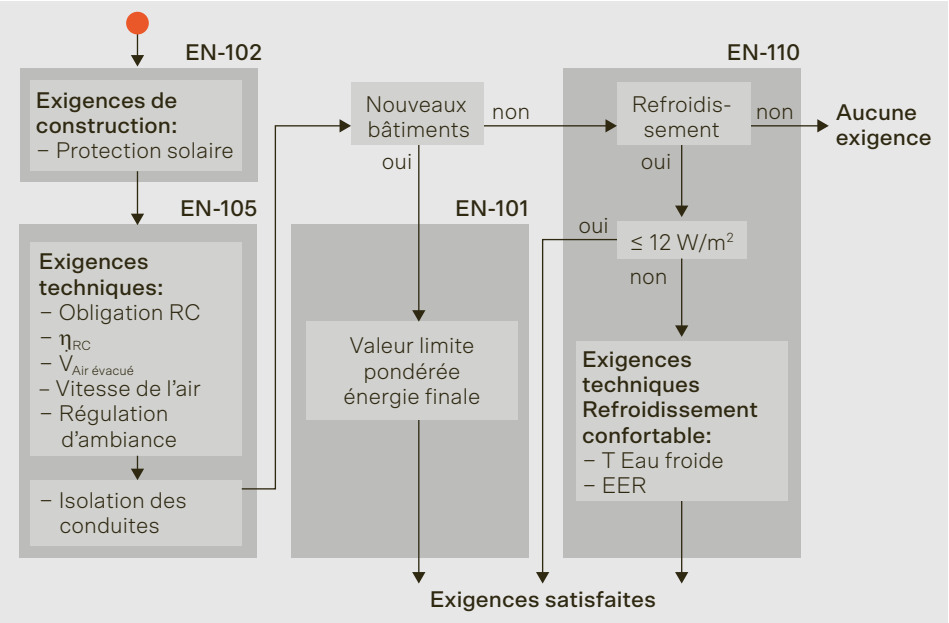


Illustration 4.24: Vue d'ensemble des exigences légales pour l'utilisation d'un refroidissement actif. (Source: Aide à l'application EN-110 Refroidissement, humidification et déshumidification)

la figure 1 dans le diagramme de confort de la norme SIA 380/2. La procédure de mesure de la température ambiante de la zone concernée est considérée comme une méthode équivalente. Les critères d'évaluation suivants s'appliquent en la matière:

- Bâtiments neufs: En cas de dépassement de la courbe limite supérieure de la figure 1 (voir Illustration 4.25) pendant plus de 100 h par an, un refroidissement est nécessaire.
- Bâtiments existants: une tolérance accrue des utilisateurs est supposée. Une valeur limite de 400 h par an s'applique dans ce cas-là.

Influences du changement climatique

Le changement climatique fait monter les températures, une situation qui se matérialise notamment par la longueur de la période de végétation. Celle-ci s'est prolongée d'une dizaine de jours par décennie, soit un jour par an en moyenne, entre 1971 et 2020. La hausse des températures entraîne également une augmentation des besoins en refroidissement des bâtiments. En outre, il convient également de relever qu'au moins une partie de ces besoins pourrait être compensée par un refroidissement par évaporation plus important dans les espaces verts [1].

Dans l'ensemble, le nombre de jours pendant lesquels il est nécessaire de refroidir les bâtiments a considérablement augmenté depuis 1960 (Illustration 4.26). S'agissant des besoins en refroidissement des bâtiments, le nombre de nuits tropicales constitue un bon indicateur à cet égard. Une nuit est considérée comme tropicale à partir du moment où la température extérieure ne descend pas en dessous de 20 °C. Le nombre de nuits tropicales a connu une forte augmentation ces dernières années en Suisse, à en croire notamment les statistiques fournies par la station météorologique de Locarno-Monti. En effet, ce chiffre a été plus ou moins multiplié par dix depuis 1960 dans cette région (Illustration 4.27). En 2024, 33 nuits tropicales y ont été recensées, soit la deuxième valeur la plus élevée depuis le début des mesures en 1901 [2].

L'augmentation du nombre de nuits tropicales a des répercussions immédiates sur le refroidissement des bâtiments. En règle générale, la nuit entraîne une différence de température entre la température intérieure et la température extérieure qui permet de refroidir les bâtiments par un rafraîchissement nocturne passif. Si toutefois les

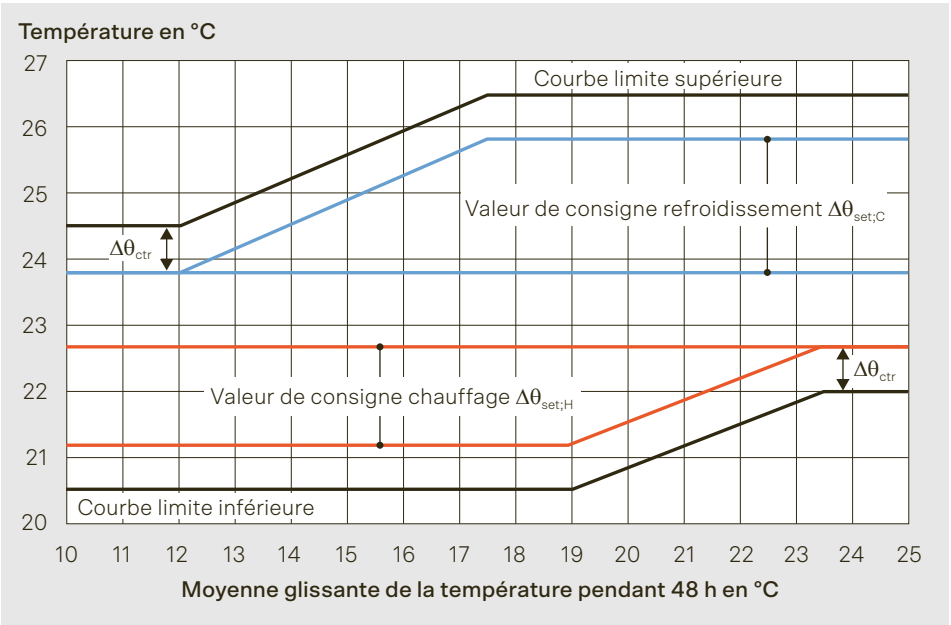


Illustration 4.25: Valeurs de consigne de la température ambiante pour le chauffage et le refroidissement. (Source: norme SIA 380/2)

températures extérieures ne descendent pas en dessous de 20 °C la nuit, ce principe ne fonctionne plus suffisamment et la chaleur emmagasinée n'est pas évacuée pendant la nuit. Par conséquent, le confort souhaité ne pourra plus être assuré uniquement par le rafraîchissement nocturne naturel.

Systèmes de refroidissement

Compte tenu des transformations climatiques, il est judicieux de choisir des systèmes de la technique du bâtiment susceptibles de servir aussi bien au chauffage des bâtiments qu'à leur refroidissement. Une pompe à chaleur eau glycolée/eau associée à un chauffage au sol constitue une telle installation capable de combiner ces deux fonctions. Elle assure un chauffage efficace et la liaison à la terre fraîche, voire le fonctionnement inversé de la pompe à chaleur permettent de refroidir les bâtiments. Étant donné que les besoins en refroidissement, tout du moins dans le domaine du froid de confort, s'accompagnent généralement de périodes de fort rayonnement solaire, le choix d'un système combiné avec une installation photovoltaïque s'avère judicieux.

Les bâtiments construits avant 1960 sont majoritairement chauffés au moyen de radiateurs. Ce constat peut néanmoins varier fortement d'un site à l'autre en Suisse. D'une manière générale, il est toutefois possible d'affirmer que les possibilités de refroidissement sont limitées pour les bâtiments existants. Le point de rosée de la surface d'un radiateur se situe l'été à 400 m au-dessus du niveau de la mer et déjà à une température de 18 °C environ avec une humidité relative de l'air ambiant de 60 %. La formation d'eau de condensation doit être impérativement évitée, car elle serait susceptible de provoquer corrosion («rouille») et problèmes d'humidité généraux et de causer des dégâts aux bâtiments. Étant donné qu'une différence de température de seulement quelques kelvins par rapport

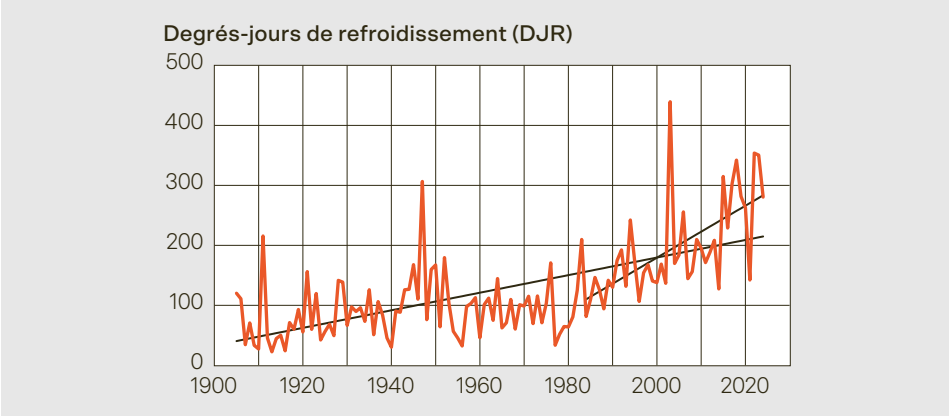


Illustration 4.26: Évolution des degrés-jours de refroidissement par rapport à la température de référence de 18,3 °C. Station climatique de Bâle-Binningen. Les courbes de tendance sur l'ensemble de la période et sur les 40 dernières années sont également représentées. (Source: Andreas Genkinger, FHNW INEB. Source des données: Météo-Suisse)

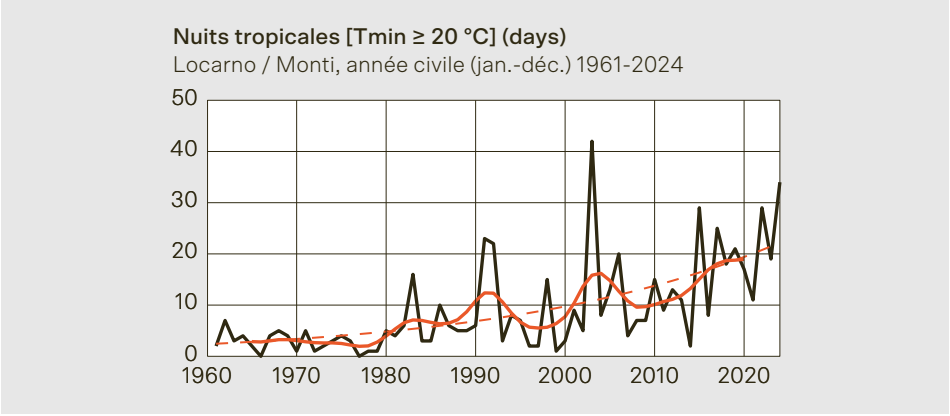


Illustration 4.27: Nuits tropicales à Locarno Monti. (Source: Météo-Suisse)

à l'air ambiant est possible et que la surface de refroidissement est limitée pour les raisons évoquées au sujet des radiateurs, les besoins en puissance frigorifique spécifique nécessaire pour climatisation peuvent être couverts par l'utilisation de systèmes de refroidissement (actif) supplémentaires.
Dès que la température des fluides frigorigènes descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant, les conduites et robinets apparents et non isolés sont également exposés à un risque de formation d'eau de condensation. C'est la raison pour laquelle les conduites et robinets froids doivent être toujours isolés d'une manière imperméable à la diffusion (Tableau 4.3). Selon le MoPEC, les exigences minimales en matière d'isolation s'appliquent aux conduites de froid et aux distances minimales à respecter entre les tuyaux.

Exemple: Free cooling via le chauffage au sol
Si un chauffage au sol est utilisé pour refroidir le bâtiment (plancher rafraîchissant changeover) et que la chaleur est directement transférée à l'installation à sondes géothermiques (post-refroidissement), notamment au moyen d'un échangeur de chaleur, il est alors question d'un refroidissement passif (Illustration 4.28). Ce processus est également appelé «natural cooling» ou «geocooling». L'efficacité de cette technique est limitée, mais les coûts supplémentaires sont pour leur part très faibles, tant d'un point de vue financier que sur un plan énergétique.

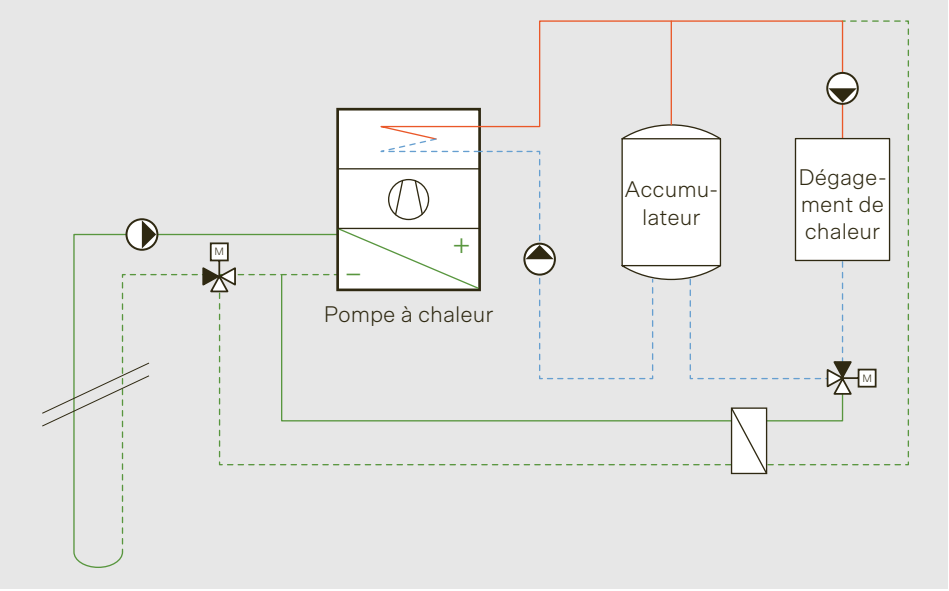


Illustration 4.28: Schéma de principe pour geocooling, sans régénération.

Tableau 4.3: Épaisseurs d'isolation minimales recommandées pour des conduites de froid. (Source: [3])

Température du fluide[1]: +6 °C, température ambiante: +25 °C, humidité relative de l'air: 60 %														
	Épaisseur d'isolation en mm													
Diamètre de conduite	17	21	22	28	35	42	48	60	76	89	114	140	168	219
λ ≤ 0,03	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	40[2]	40[2]
λ >0,03 à ≤0,04	19	19	19	25	25	25	25	25	32	32	32	38	2 x 19 = 38	2 x 25 = 50
λ >0,04 à ≤0,05	30	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50	50	60	80
1: La température du fluide est celle de l'aller; le retour doit être isolé de manière identique. 2: Les isolations en PIR doivent être équipées d'un pare-vapeur ≥ 50 m (μ x s).														

Régénération des sondes géothermiques

Dans le cas de la régénération des sondes géothermiques, l'association suissetec mentionne que la température d'alimentation ne doit pas dépasser les 40 °C [4]. Des températures trop élevées réduisent l'apport de chaleur du terrain et sont susceptibles de provoquer une accumulation de chaleur locale. En outre, la structure du sol peut connaître des modifications qui nuiraient au transfert de chaleur. De plus, le fluide des sondes perd également de sa fraîcheur à un rythme plus soutenu en cas de température élevée. Inversement, les basses températures peuvent générer de la condensation et causer des dommages à un capteur solaire, et ce, notamment dans le cas des modèles avec vitrage. Une limitation contrôlée de la température permet d'assurer un fonctionnement efficace et durable. L'Illustration 4.29 et l'Illustration 4.30 représentent des systèmes de régénération possibles.

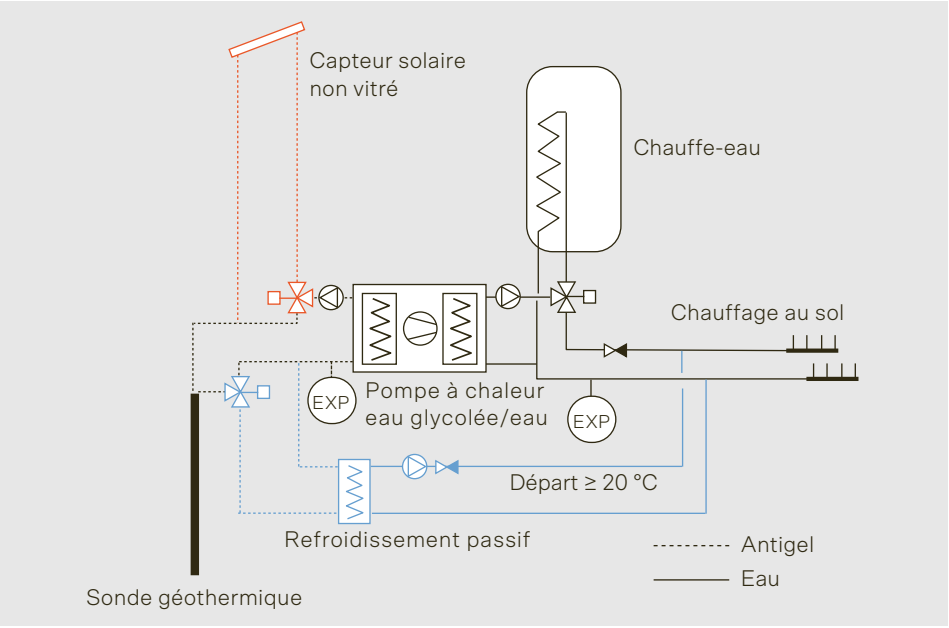


Illustration 4.29: Système de chauffage par le sol et de production d'eau chaude complété par une régénération par refroidissement passif et/ou capteur solaire non vitré. Une surveillance du point de rosée ou une limitation de la température de départ à 20 °C minimum garantit qu'aucune condensation ne se forme. (Source: [4])

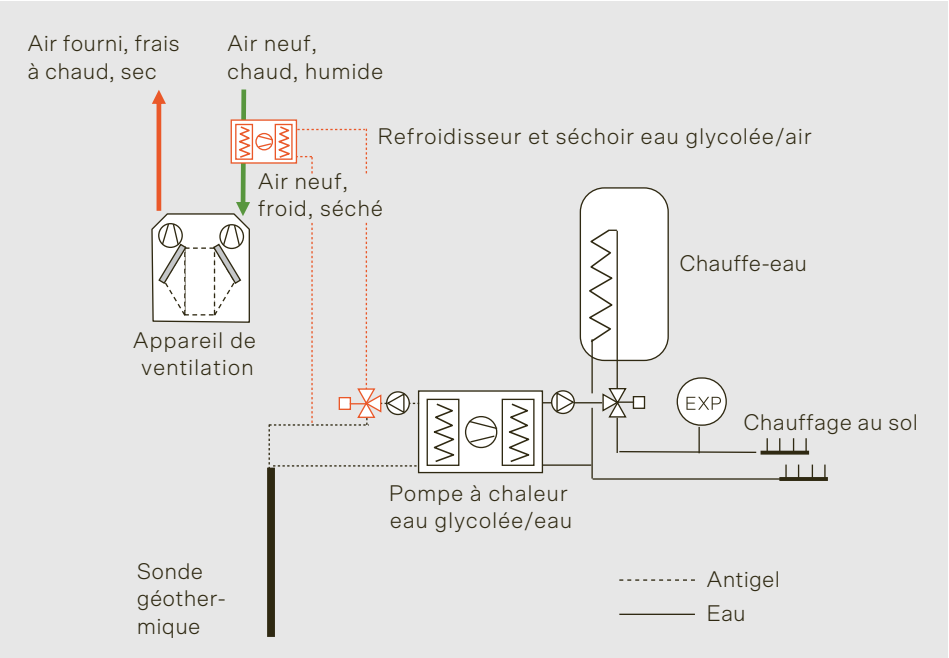


Illustration 4.30: Système de chauffage par le sol et de production d'eau chaude complété par une régénération par prélèvement de chaleur dans l'air neuf (et séchage). (Source: [4])

Valeurs caractéristiques
Dans le cas du refroidissement, l'efficacité des appareils est indiquée par l'EER (Energy Efficiency Ratio) et le SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio). Ces indicateurs correspondent au COP et au SCOP pour le chauffage. La valeur EER désigne le rapport entre la puissance frigorifique et la puissance électrique requise. À l'instar du COP, l'EER s'applique uniquement à des conditions d'exploitation tout à fait particulières. Une valeur EER élevée indique une utilisation plus efficace de l'énergie électrique et des coûts d'exploitation plus faibles. La valeur SEER mesure, quant à elle, l'utilisation de l'installation frigorifique pendant une année entière et elle prend donc en considération les différentes conditions d'exploitation tout au long de cette période. Plus la valeur SEER est élevée, plus l'efficacité du système est importante. Les valeurs moyennes caractéristiques des petites pompes à chaleur réversibles et facilement disponibles sur le marché sont regroupées dans le Tableau 4.4.

Commutation entre chauffage et refroidissement
Un passage trop rapide du chauffage au refroidissement (ou inversement) peut entraîner une consommation d'énergie supplémentaire considérable. Ce lien de cause à effet s'explique par la nécessité de chauffer et de refroidir en alternance la masse thermique du système de fourniture de chaleur et/ou des accumulateurs techniques au moment de commuter entre chauffage et refroidissement. Dans le pire des cas, le chauffage fonctionne tôt le matin et le refroidissement est activé pendant la journée. Ces situations peuvent être évitées grâce à une régulation appropriée. Les paramètres de régulation importants sont les suivants:

EER +7 °C/+12 °C	3,0
EER +18 °C/+23 °C	4,5
SEER +7 °C/+12 °C	4,9
SEER +18 °C/+23 °C	6,6

Tableau 4.4: Valeurs EER et SEER caractéristiques des petites pompes à chaleur réversibles. 2024.

- la limite de chauffage
- la limite de refroidissement
- la durée moyenne de la température extérieure

Les grandeurs de mesure importantes sur l'entrée du régulateur sont les suivantes:
- la température extérieure
- la température de l'air ambiant
- l'humidité de l'air

Un exemple de courbe de chauffe et de refroidissement pour le fonctionnement en alternance d'une installation avec free cooling via le chauffage au sol est représenté sur l'Illustration 4.31. Ce cas précis repose sur une moyenne mobile de la température extérieure pendant une période suffisamment longue. Une période minimale de 12 à 24 heures est recommandée. Il est également conseillé de prévoir une différence de température d'au moins 4 °C entre la limite de chauffage et la limite de refroidissement (zone neutre). Sur l'Illustration 4.31, la limite de chauffage est de 14 °C et la limite de refroidissement s'élève à 18 °C.
La durée moyenne importante choisie ici pour la température extérieure permet d'éviter globalement les périodes de chauffage et de refroidissement pendant la même journée. Néanmoins, il est recommandé de prévoir un temps mort d'au moins 12 heures entre le chauffage et le refroidissement.
Par ailleurs, il est nécessaire de tenir compte du risque de condensation sur le sol (risque de glissade) ou sur les conduites de distribution et les robinets. En phase de refroidissement, la température de surface du sol est généralement supérieure de 1 à 2 K à la température du fluide circulant dans la pompe à chaleur. Dans le cas d'une température de surface de 20 °C, le risque de formation d'eau de condensation est très faible au regard du climat suisse classique. Cette température est encore considérée comme agréable avec des chaussures. Pour le Tessin, la

limite relative au risque de condensation est supérieure de 1 K environ.
La courbe de refroidissement de l'Illustration 4.31 ne présente aucune inclinaison. Par conséquent, la puissance frigorifique augmente au fur et à mesure que la température extérieure monte. Toutefois, le risque de condensation s'accroît également dans ces conditions. C'est la raison pour laquelle il est recommandé de prévoir une courbe de refroidissement qui monte légèrement lorsque la température extérieure augmente. Une autre solution complémentaire consiste à équiper l'installation d'un système de surveillance du point de rosée. En outre, il est important de choisir des thermostats d'ambiance qui peuvent être utilisés aussi bien pour le chauffage que pour le refroidissement. En effet, les thermostats d'ambiance dimensionnés uniquement pour le chauffage restent pour ainsi dire «fermés» pendant l'été.

Indications pour la planification

- Les prescriptions cantonales en matière d'environnement, d'énergie et de construction doivent être prises en compte et respectées.
- Le besoin en chaleur et en froid du bâtiment, avec les températures de fluide associées, doit être défini lors d'une phase préalable.
- Dans le cas d'installations à sondes géothermiques, il convient de prendre en compte l'utilisation primaire (chauffage ou refroidissement) lors du choix de la longueur de sonde.
- En cas d'exploitation des eaux souterraines, des eaux de surface et des eaux usées, il convient impérativement de définir les températures de restitution maximales en concertation avec les autorités compétentes.
- Le dimensionnement et la définition des limites d'utilisation ainsi que les interfaces hydrauliques et de régulation doivent être impérativement établis avec le fabricant ou le fournisseur de l'installation frigorifique.
- Il faut également accorder une attention particulière à l'isolation thermique (eau de condensation) du système de post-refroidissement s'il est exécuté en mode free cooling (conduites froides du post-refroidissement dans l'espace chauffé).
- Il est impératif de veiller tout particulièrement 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

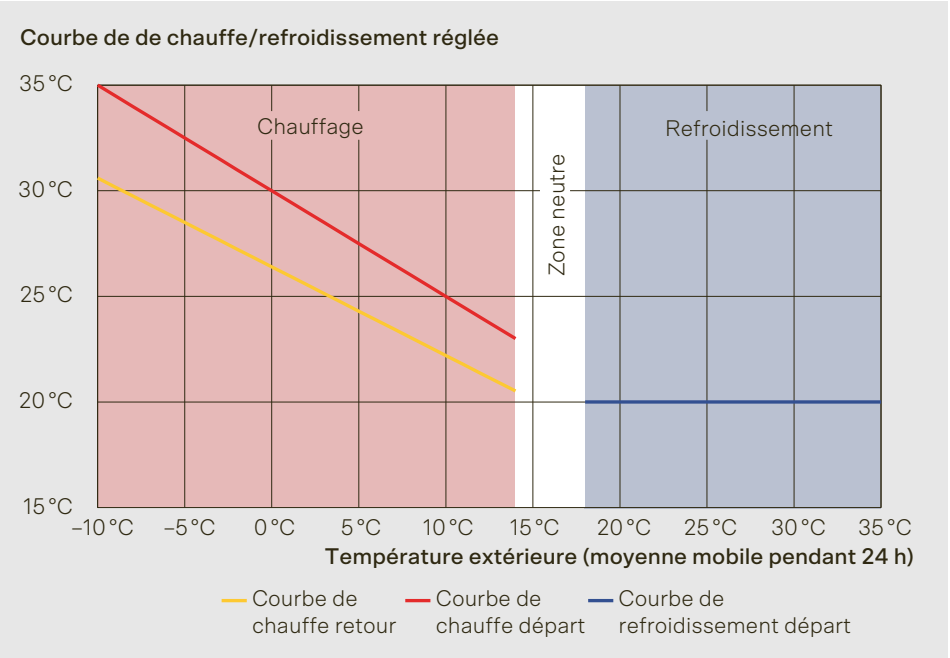


Illustration 4.31: Exemple de courbe de chauffe et de refroidissement pour free cooling via le chauffage au sol. (Source: Andreas Genkinger, FHNW INEB)

le fonctionnement, notamment dans des installations complexes.
– Dans les systèmes de chauffage au sol, il convient de prévoir une limitation de la température de départ (minimum 18 °C) (pour empêcher la formation de condensat sur le sol ou dans la chape).

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 (RC) ou l'utilisation des rejets thermiques (URT). 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, besoins en force requise inclus, 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 de tels appareils, le flux d'air est tout d'abord guidé via l'évaporateur (déshumidification) puis via le condenseur (réchauffement du flux d'air). L'excédent de chaleur est souvent utilisé pour chauffer l'eau du bassin.
Les installations de ventilation décentralisées constituent un autre domaine d'application. Dans les installations de petite taille avec une distance inférieure à 25 m environ entre les installations d'air rejeté et les installations d'air entrant, l'évaporateur est directement intégré dans le monobloc d'air rejeté et 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 excédent de chaleur, les installations peuvent être utilisées pour chauffer le bâtiment ou, en dehors 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 des coûts élevés très rapidement.

4.6 Sources

[1] Calanca, P., Holzkämper, A., Isotta, F. A., Die thermische Vegetationszeit im Wandel des Klimas. Recherche Agronomique Suisse 14: pp. 150 à 158, 2023
[2] MétéoSuisse. Bulletin climatologique année 2024. Zurich, 2025
[3] Notice technique, Isolation dans la technique du bâtiment, suissetec, 2023
[4] Notice technique 5, Sondes géothermiques: décharge ou régénération?, suissetec, 2020

Chapitre 5

Dégagement de chaleur

Un système de dégagement de chaleur est un système qui cède à la pièce la chaleur générée par le système de production de chaleur et transportée par le système de distribution de chaleur. Nous allons nous intéresser ici au cas du chauffage, il sera ensuite question du système de dégagement de chaleur. Les températures du système de dégagement de chaleur dépendent directement de la puissance de chauffage normalisée (puissance thermique à installer) du bâtiment et, par conséquent, de ses conditions énergétiques (lieu, emplacement, géométrie, construction, isolation thermique, utilisation) et des prescriptions légales. La réduction des besoins en énergie exigée par les lois sur l'énergie en vigueur depuis les années 80 a donc eu un impact direct sur la puissance thermique à installer et la conception des systèmes de chauffage domestique. Aujourd'hui, c'est le législateur qui impose les températures de départ admissibles maximales.

La réalisation est un critère essentiel en ce qui concerne les températures nécessaires dans le système de chauffage. La taille de la surface de transmission de chaleur, notamment, est pertinente, sachant qu'elle peut varier considérablement selon qu'il s'agit d'un chauffage au sol ou d'un chauffage par radiateurs.

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 de condensation au sein du système de chauffage doit être la plus basse possible, tout comme la température de départ. En particulier, la température de départ glissante de l'exploitation constante doit être préférée en cas de charge partielle. La température de sortie de la pompe à chaleur et pas uniquement du système de dégagement de chaleur doit ainsi être considérée comme une grandeur déterminante. Les pompes à chaleur fonctionnant à des températures de sortie inutilement élevées gaspillent de l'énergie électrique précieuse et alourdissent le budget de fonctionnement de l'exploitant. En outre, la durée de vie technique des composants soumis à des pressions d'exploitation plus élevées (dans le circuit frigorifique) est raccourcie. Sur le plan énergétique, les bâtiments qui proposent les meilleures conditions pour le fonctionnement des pompes à chaleur sont les maisons à très faible consommation d'énergie avec des systèmes de dégagement à surface étendue, qui sont toutefois également soumises, dans leur fonctionnement, aux lois de la thermodynamique et de la construction. Des limites sont donc également fixées au niveau de leur dimensionnement. Si les appareils les plus modernes proposent, pour certains, une modulation de la puissance, la plage de modulation reste

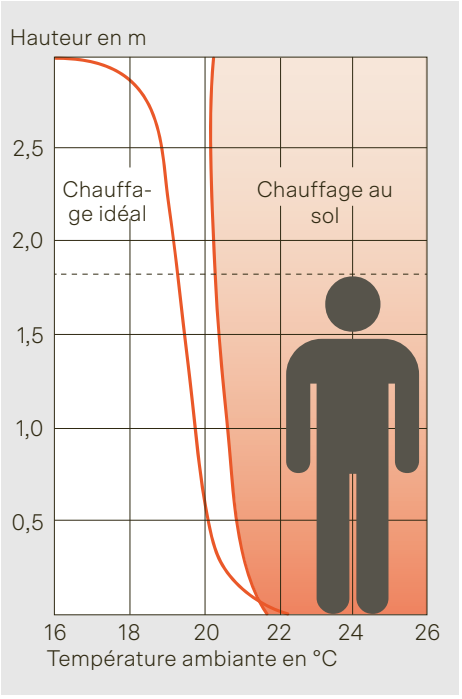


Illustration 5.1: Courbe de température dans une pièce avec chauffage au sol. La température chute légèrement en fonction de la hauteur et est ressentie comme agréable.

cependant plus ou moins limitée. 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 dégagement 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. Sur le plan physique, le dégagement de chaleur vers la pièce se base presque exclusivement sur la convection et le rayonnement thermique. Le rapport entre la convection et le rayonnement est exprimé pour tous les systèmes de dégagement de chaleur par l'exposant de corps de chauffe n dans la liste de sélection des corps de chauffe et est important pour les calculs ultérieurs. Plus l'exposant de corps de chauffe est petit, plus la proportion de rayonnement est importante. L'exposant de corps de chauffe est par exemple:

- Corps de chauffe à plaques: n = 1,2 – 1,3
- Radiateurs n = 1,3
- Chauffages au sol: n = 1,1

Chauffage au 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.
- Autorégulation: le dégagement de chaleur s'autorégule jusqu'à un certain degré. Exemple: lorsque l'air ambiant se réchauffe en raison du rayonnement solaire ou du nombre accru de personnes dans la pièce, le dégagement de chaleur de la surface au sol diminue automatiquement. Cet effet d'autorégulation est particulièrement marqué avec les chauffages au sol du fait de la faible différence de température entre la température de l'air ambiant et la température en surface de la surface de chauffe (en règle générale environ 2 K). Bonne répartition de la chaleur sur toute la hauteur de la pièce (Illustration 5.1).
- La chape (combles) peut servir d'accumulateur d'énergie.

Illustration 5.2: Courbe du coefficient de performance en fonction de la température de départ de chauffage (°C) d'une pompe à chaleur avec collecteur terrestre (0 °C) et chauffage au sol (hiver).

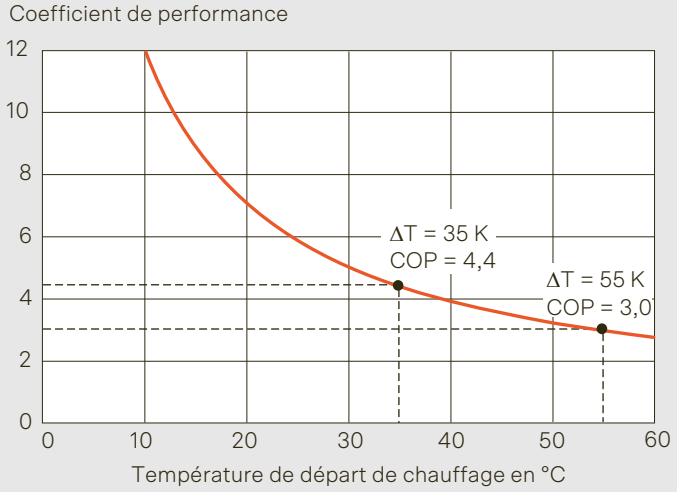
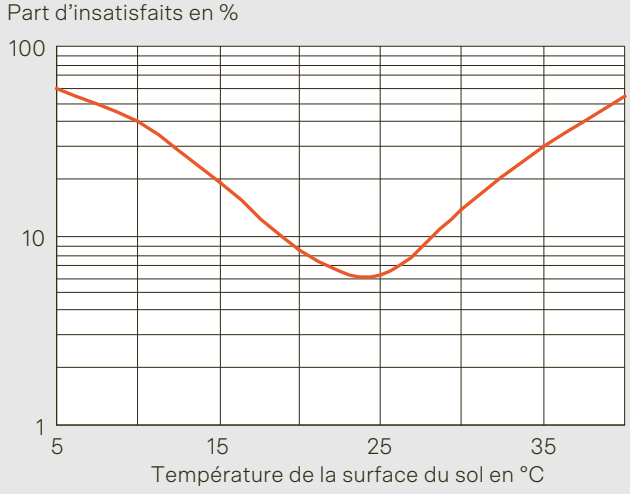


Illustration 5.3: Pourcentage des personnes non satisfaites, qui portent des pantoufles, en fonction de la température de la surface du sol.



– En été, le chauffage au sol peut également servir à refroidir le sol (en douceur) (changeover). Il suffit tout simplement d'installer un échangeur de chaleur supplémentaire en séparation du réseau entre le chauffage et le refroidissement. Éviter la formation de condensat (régulation du point de rosée)!

Inconvénients

– Inertie due à l'installation dans la chape

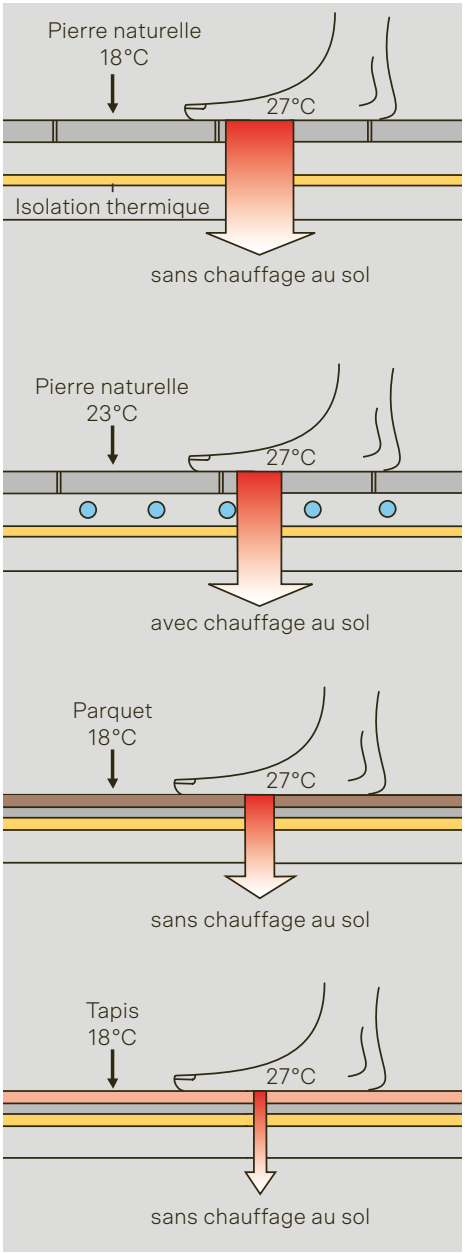


Illustration 5.4: Dégagement de chaleur par le pied selon les différents matériaux de sol.

– Accès au système de dégagement de la chaleur plus donné après l'installation.

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 (Illustration 5.3).
– L'Illustration 5.4 montre très clairement le dégagement de chaleur par le pied selon les différents matériaux de sol.

Systèmes de composants thermoactifs

Les systèmes de composants thermoactifs sont des éléments de construction qui font partie des surfaces de délimitation d'une pièce et qui sont alimentés en fluide caloporteur ou frigorigène 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

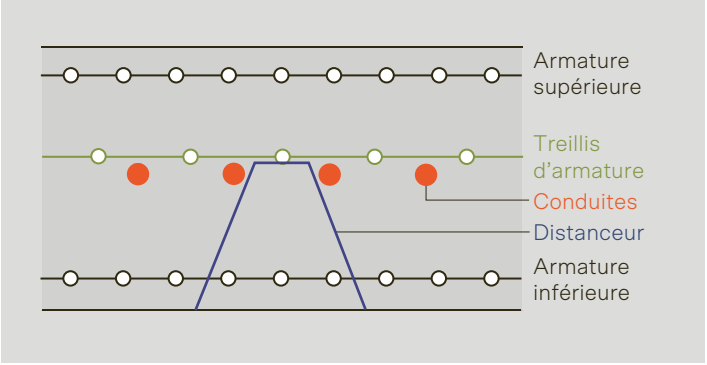


Illustration 5.5: Coupe détaillée des éléments thermoactifs.

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 W/m^2 K (par convection env. 2 à 3 W/m^2 K, ceux par rayonnement env. 5 W/m^2 K). Par exemple, à 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/m^2. Si une puissance thermique de 50 W/m^2 agit pendant 24 heures à pleine puissance, la quantité de chaleur qui peut être transmise chaque jour au local est de 1,2 kWh/m^2.

Chauffage par radiateurs

Avantages
- Réagit rapidement aux changements de charge.
- Le système de dégagement de chaleur 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.
- Flexibilité élevée lors de transformations, les radiateurs étant aisément démontables et pouvant être déplacés.

Inconvénients
- Rendement thermique plus faible à températures de départ basses
- Mauvaise répartition de la température sur la hauteur des pièces (Illustration 5.6)
- Sols froids avec dalles
- Exige des surfaces de radiateurs relativement grandes.
- Ce système ne permet pas de refroidir.

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.

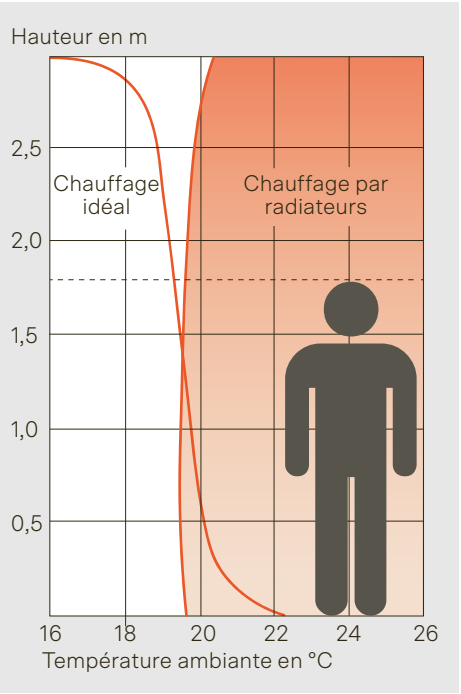


Illustration 5.6: Courbe de température avec un chauffage par radiateurs.

Indications pour la planification
- Choisir les températures de départ les plus basses possibles (radiateur basse température).
- Respecter les conditions-cadres légales (températures de départ maximales).
- Tenir compte de la différence de température lors du choix du fluide frigorigène (glissement de température).
- En cas de revêtement en parquet, tenir compte de la température de départ maximale des conduites situées dans les combles (normes SIA).

5.2 Installations de climatisation

Chauffage à air

Systèmes
Le chauffage à air chaud pour la ventilation d'une maison (aussi appelé aération douce) pour maisons passives et Minergie-P constitue une alternative possible aux systèmes de dégagement de chaleur à circulation d'eau. Son principal avantage réside dans le fait que l'on peut se passer d'un système de chauffage à circulation d'eau séparé. Il exige une planification extrêmement 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.
- Système de distribution supplémentaire inutile (utilisation du système de ventilation à des fins de chauffage)

Inconvénients
- 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 (COP plus mauvais)
- L'eau a une capacité thermique 3200 fois supérieure à l'air (en volume), les installations de ventilation sont donc moins efficientes sur le plan énergétique que les systèmes à circulation d'eau (débits volumiques d'air élevés requis).
- L'air sec est un danger.

Indications pour la planification
- Choisir les températures d'air pulsé les plus basses possibles. Il faut toutefois s'assurer qu'il n'y ait pas de courant d'air.
- Tenir compte de la différence de température lors du choix du fluide frigorigène (glissement de température).
- Éviter l'installation d'une entrée d'air pulsé dans les pièces habitées.

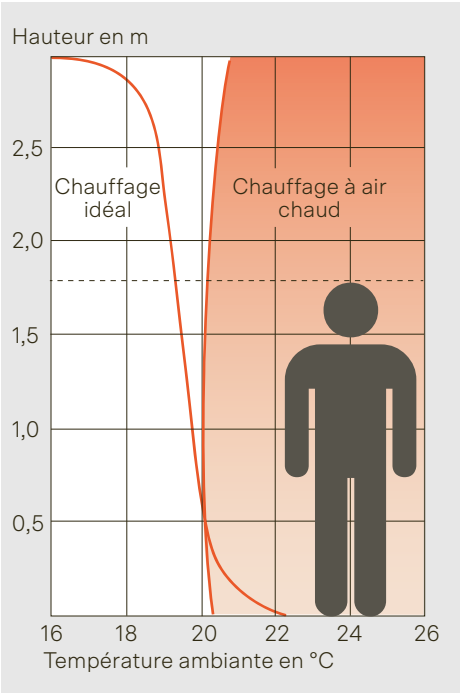


Illustration 5.7: Courbe de température avec un chauffage à air chaud.

5.3 Production d'eau chaude

Systèmes

On distingue deux systèmes de production d'eau chaude 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.

Les deux systèmes peuvent également être combinés (p. ex. pompe à chaleur à eau chaude, souvent appelée chauffe-eau pompe à chaleur).
D'une manière générale, un cycle anti-légionellose n'est plus recommandé, et ce, quelle que soit sa fréquence (quotidienne ou hebdomadaire). Selon l'utilisation des bâtiments (établissements de santé, installations d'hébergement, écoles, etc.), il est conseillé de considérer cette mesure au cas par cas. L'eau chaude doit être maintenue à une température minimale de 55 °C en tout point du système. À l'heure actuelle, la priorité en matière de prévention de légionelles est accordée au système de distribution, et non pas à l'accumulateur.

Utilisation indirecte

Avantages

- Intégration simple à des raccordements hydrauliques standardisés
- Composants standard très accessibles

Inconvénients

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

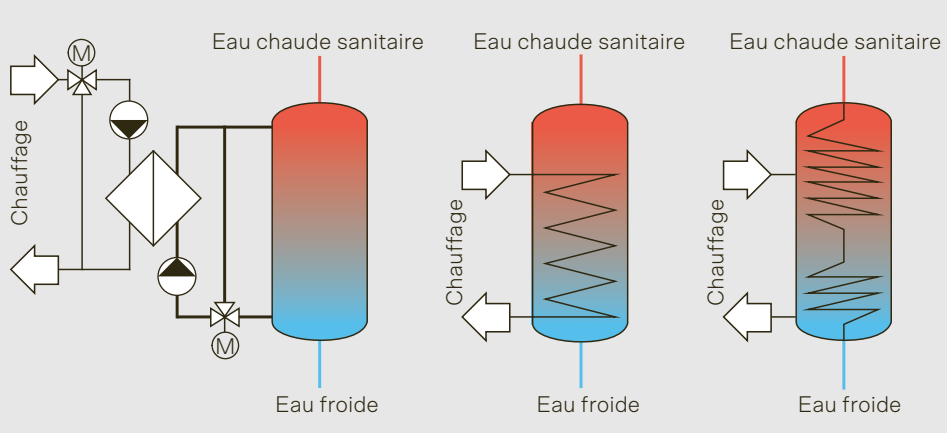


Illustration 5.8: Système de production d'eau chaude indirecte.

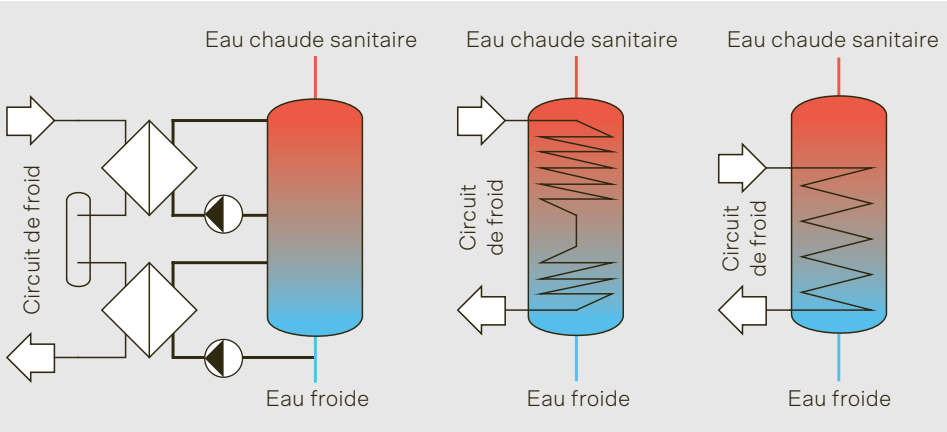


Illustration 5.9: Système de production d'eau chaude directe.

– Rendement plus faible en raison de l'échangeur de chaleur supplémentaire
– Températures de l'eau plus basses en raison de l'échangeur de chaleur supplémentaire

Exemples types d'utilisation indirecte:
– Accumulateur avec échangeur de chaleur à l'extérieur
– Accumulateur-registre
– Accumulateur combiné ou spiro

Remarque: La mise en place d'un circuit prioritaire pour l'eau chaude sanitaire avec niveau de température adapté (p. ex. 55 °C pour la charge d'eau chaude sanitaire, 40 °C pour le chauffage) est à préférer au fonctionnement en parallèle (simultané) du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire, afin que la pompe à chaleur puisse fonctionner au point de fonctionnement optimal de chacun (températures de sortie les plus basses possibles; efficacité la plus grande possible).

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 frigorigène

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 frigorigène
– Des quantités plus importantes de fluide frigorigène
– Accumulation de calcaire plus importante, donc nettoyage de l'échangeur de chaleur plus fréquent (désurchauffeur, condenseur)
– Le circuit de froid-lubrifiant doit être conçu dans un matériau de classe alimentaire (tubes à double paroi avec sonde de fluide frigorigène)

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.
– Échangeurs de chaleur séparés (désur-chauffeur, 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 (observer les exigences légales).
– Les mesures de prévention de la légionellose doivent être respectées dans l'ensemble du réseau 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.)
- L'emplacement doit être si possible proche du consommateur principal afin de réduire les pertes par distribution et les durées de productivité.

Légionelles

Les bactéries de la classe des légionelles sont présentes presque partout dans la nature, ainsi que dans l'eau potable. L'inhalation de légionelles provoque un risque d'infection («légionellose»), principalement des poumons. Les légionelles trouvent des conditions de vie idéales à des températures entre 25 et 45 °C, elles ne sont détruites qu'à partir de 55 °C. C'est la raison pour laquelle la norme SIA 385/1 (édition 2020) exige le respect des températures minimales suivantes: 55 °C à la sortie de l'accumulateur pour des conduites d'eau maintenues en température et 52 °C pour des conduites non maintenues en température. Dans le cas d'une utilisation du propane en tant que fluide frigorigène, les températures de sortie peuvent atteindre les 65 °C. Les conduites maintenues en température doivent être maintenues à une température minimale de 55 °C en tout point du système et la température ne doit pas descendre en dessous de 50 °C au point de prélèvement. Il est recommandé d'installer les conduites d'eau froide de manière à éviter une augmentation de leur température (échauffement susceptible d'être causé notamment par des conduites d'eau chaude ou de chauffage montées en parallèle). Le cycle anti-légionellose hebdomadaire qui fait monter la température à 60 °C minimum toutes les semaines n'est plus recommandé en raison du risque de sélection indésirable de souches de légionelles avec une tolérance de température et une infectiosité accrues selon la norme SIA 385/1:2020. Il n'y a aucun risque de formation de légionelle dans de l'eau chaude sanitaire consommée dans les 24 heures; c'est pourquoi l'accumulateur ne doit pas être choisi trop grand (dimensionnement selon la norme SIA 385/2).

Les autres mesures à prendre au niveau du réseau de distribution sont:

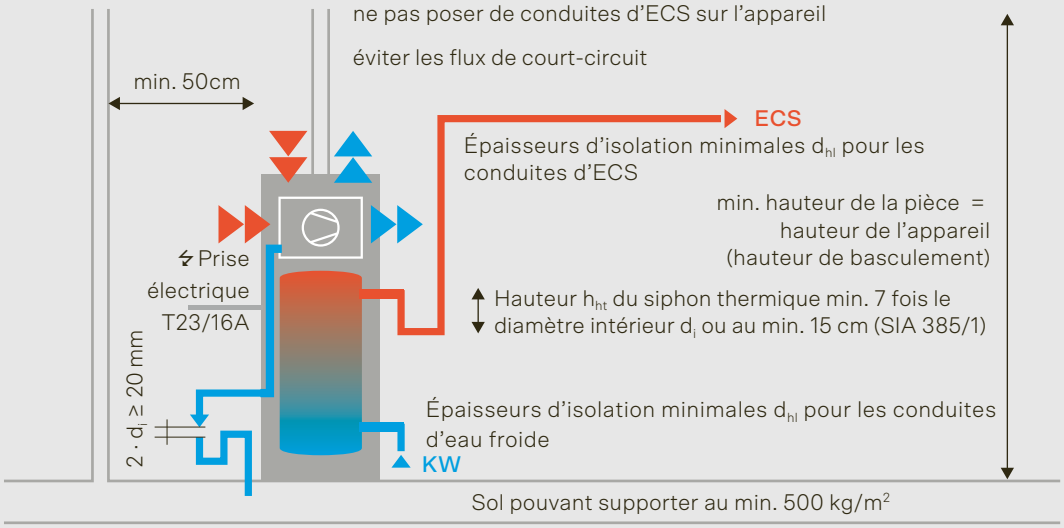


Illustration 5.10: Placement de l'échangeur de chaleur – pompe à chaleur. (Source: GKS Merkblatt «Warmwasser-Wärmepumpen»)

- Volume minimal de la pièce: Observer les indications du fournisseur

- Séparation du réseau des parties de conduites non utilisées
- Conduites courtes
- Bon rinçage (pas d'eau stagnante)
- Rincer et nettoyer régulièrement les points de prélèvement rarement utilisés ainsi que les flexibles de douche, les robinetteries de baignoire et de douche.

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 d'un bâtiment. L'air est refroidi et déshumidifié dans l'évaporateur, c'est-à-dire que le local choisi est par exemple une pièce de stockage ou de séchage. Un bon dimensionnement, le siphonnage des raccords d'eau chaude sanitaire (selon le système de distribution, p. ex. inutile en cas de chauffage auxiliaire) et une isolation thermique complète assurent une efficacité énergétique élevée, les appareils étant ainsi indiqués pour remplacer les chauffe-eau électriques. Outre les appareils compacts, il existe également des installations split pour une utilisa-

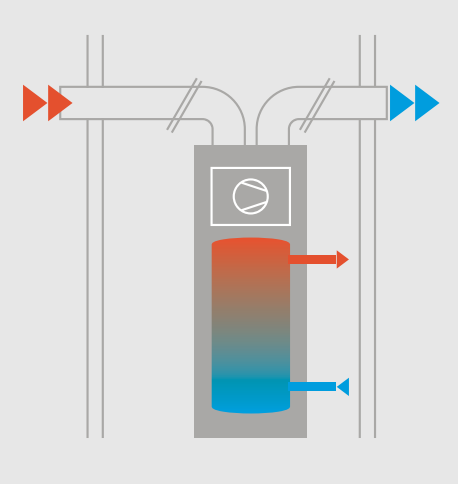


Illustration 5.11: Chauffe-eau à pompe à chaleur avec système de canal pour l'exploitation de l'air extérieur comme source de chaleur. (Source: GKS Merkblatt «Warmwasser-Wärmepumpen»)

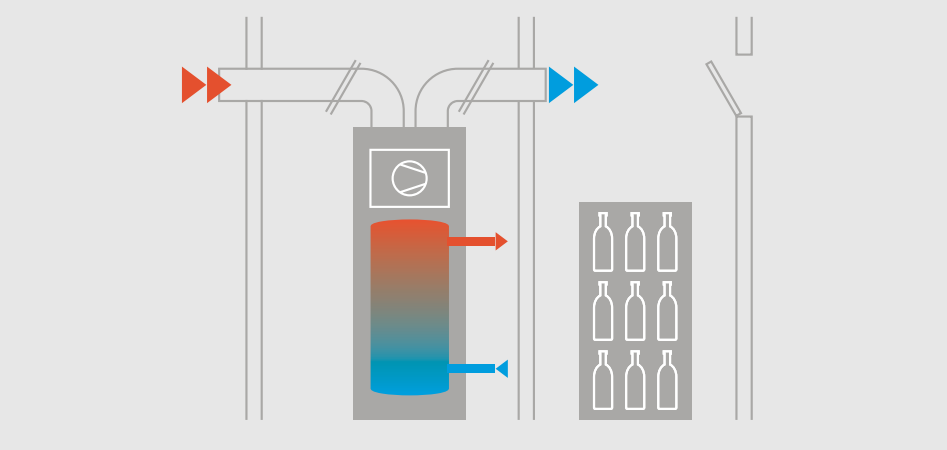


Illustration 5.12: Placement du chauffe-eau à pompe à chaleur pour le refroidissement de la pièce.

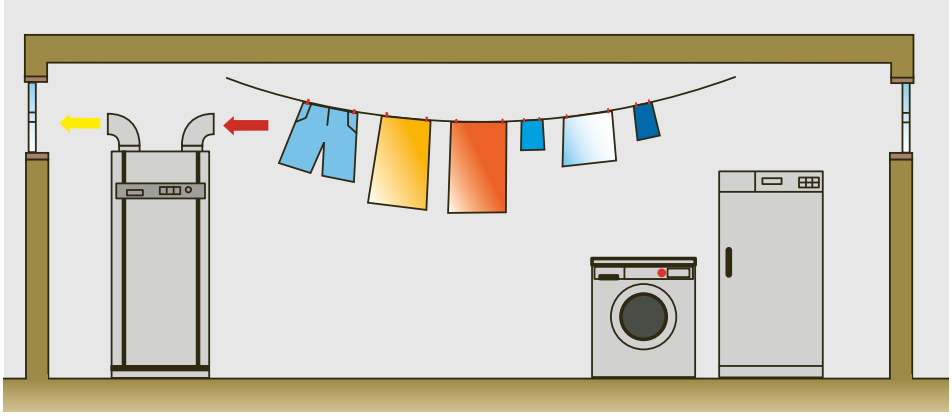


Illustration 5.13: Placement du chauffe-eau à pompe à chaleur pour la déshumidification de la pièce.

tion simplifiée de l'air extérieur en tant que source de chaleur.

Indications pour la planification
- Le bilan énergétique doit faire l'objet de vérifications approfondies afin d'éviter le vol de chaleur par les pièces chauffées
- Prévoir une très bonne isolation thermique par rapport aux pièces chauffées
- Les mesures de prévention de la légionellose doivent être respectées dans l'ensemble du réseau d'eau chaude (voir par. 5.3)
- Prévoir un corps de chauffe électrique supplémentaire en cas d'urgence
- Évacuation du condensat nécessaire

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

Indications pour la planification
- Respecter les prescriptions cantonales concernant l'installation et l'énergie (p. ex. recouvrement du bassin)
- Veiller au choix des matériaux pour les composants
- Veiller au lieu d'installation pour une pompe à chaleur air-eau (acoustique, encrassement, limites de construction)
- Respecter les directives (autorisations)

Chapitre 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 approprié, sans montage en série des circulateurs etc.
- Éventuel découplage hydraulique de la production de chaleur par rapport à la distribution de chaleur au moyen des accumulateurs ou avec un séparateur hydraulique (si nécessaire)
- Purge de l'installation avant le raccordement de la pompe à chaleur.
- Dégagement de la puissance thermique (éventuellement y c. les pertes par raccordement du condenseur)
- Degré de couverture de la pompe à chaleur (si possible monovalente)
- Débit d'air possible et/ou nécessaire dans le cas d'une pompe à chaleur air-eau
- Processus de dégivrage dans le cas d'une pompe à chaleur air-eau
- Températures de fonctionnement du système de dégagement de chaleur (notamment la température de départ maximale)
- Limites d'utilisation de la pompe à chaleur
- Adaptation aux cas de charge partielle
- Puissance disponible provenant de l'environnement (évent. avec le raccordement de l'évaporateur)
- 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 (intérieur et extérieur)
- Optimisation de l'exploitation, voir cahier technique SIA 2048 (listes de contrôle)

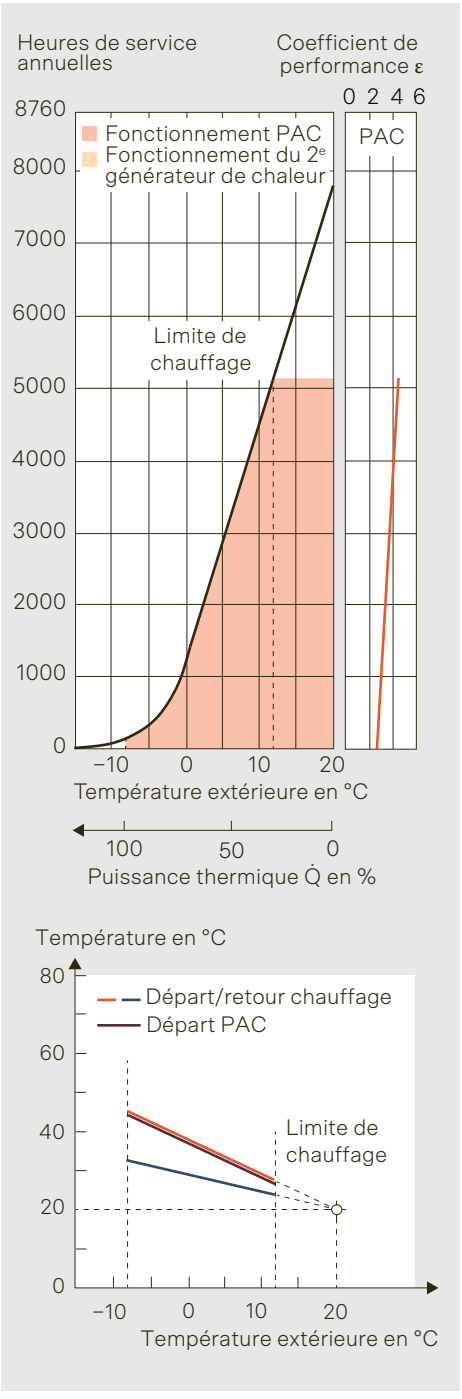


Illustration 6.1: Fonctionnement monovalent.

6.2 Modes d'exploitation

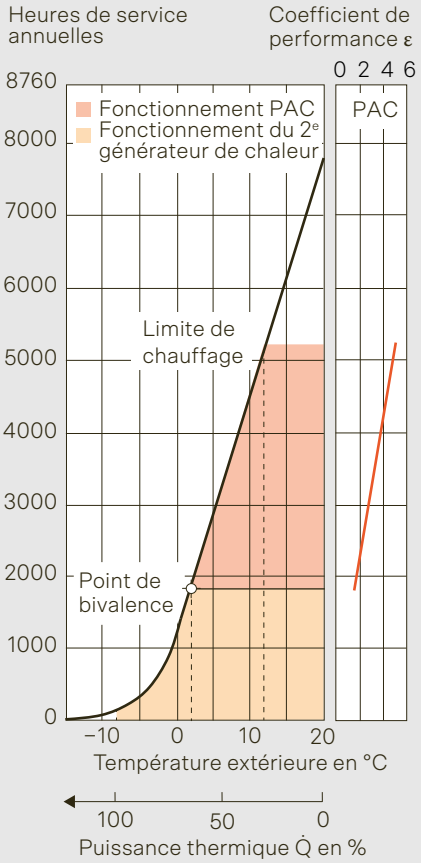
Fonctionnement monovalent
En mode de fonctionnement monovalent, la pompe à chaleur fournit la puissance de chauffage nécessaire dans tous les états de fonctionnement. La pompe à chaleur doit donc être dimensionnée en fonction de la puissance thermique maximale à installer dans le bâtiment pour la température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

Fonctionnement bivalent
Lorsque la pompe à chaleur ne peut (ou ne doit) pas fournir l'ensemble de la puissance de chauffage, il faut un second générateur de chaleur. On parle alors d'un système ou d'un fonctionnement bivalent. Le point de bivalence est fonction de différents critères:
- La puissance de raccordement nécessaire ou possible
- La température de départ maximale
- Encombrement du chauffage complémentaire
- Température de la source de chaleur

Pour les plus grandes installations, aussi
- Rentabilité
- Redondance

Indications
- La citerne à mazout, la chaudière, les accumulateurs et la cheminée nécessitent de l'espace supplémentaire.
- Dans la mesure du possible, il faut éviter les systèmes de chauffage bivalents dans les petites installations (maisons familiales, petits immeubles), car trop complexes.

La limite du point de fonctionnement permettant à la pompe à chaleur de fournir la puissance de chauffage dépend de la température de l'air extérieur. Elle s'appelle alors «point de



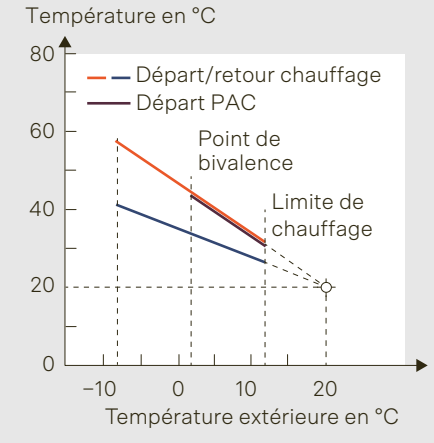


Illustration 6.2: Fonctionnement bivalent-alternatif.

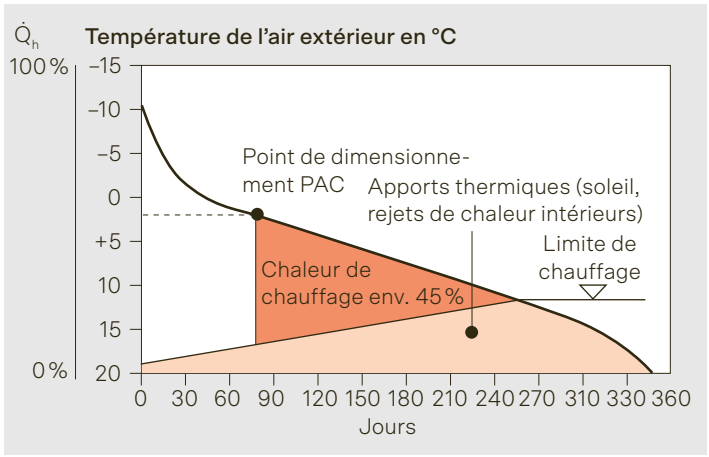


Illustration 6.3: Fonctionnement bivalent-alternatif.

bivalence», et la température correspondante «température de bivalence». On distingue deux modes de fonctionnement.

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 (Illustration 6.2).

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 (Illustration 6.4).
En mode partiellement parallèle, la pompe à chaleur s'arrête totalement à une température extérieure 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.

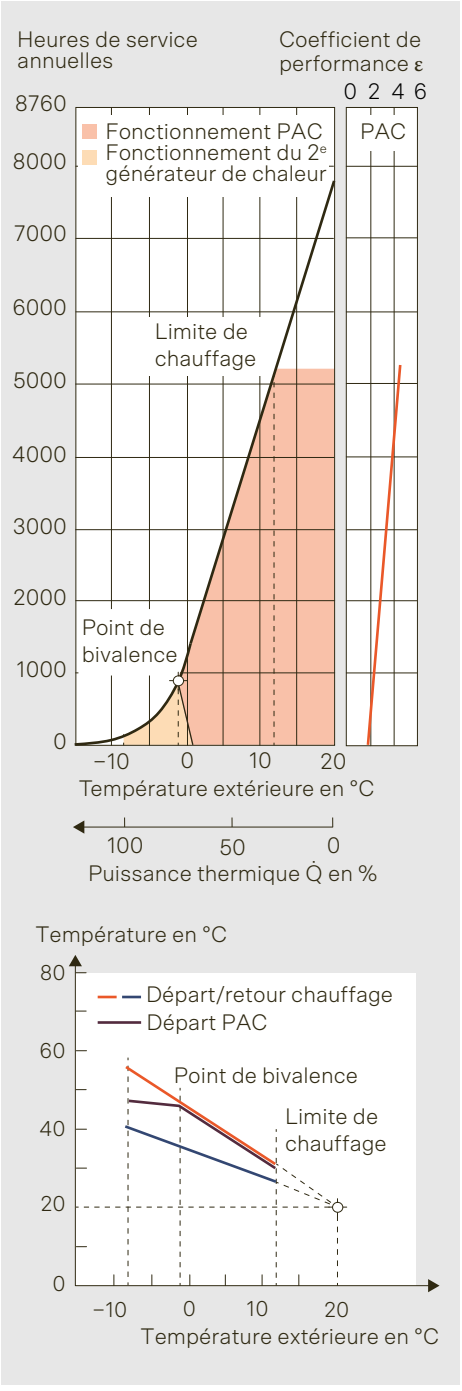


Illustration 6.4: Fonctionnement bivalent-parallèle ou bivalent partiellement parallèle.

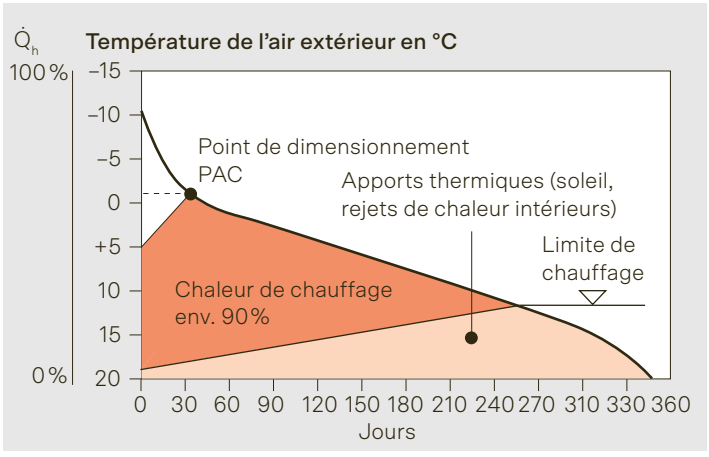


Illustration 6.5: Fonctionnement bivalent-parallèle.

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 des ventilateurs concernés. Les systèmes de dégagement de chaleur sont réglés, suivant la température requise du fluide de chauffage, entre max. 40/30 °C pour les corps de chauffe (50 °C possibles en cas d'assainissement) et min. 26/22 °C pour les chauffages de surface (maximum 35 °C). Les systèmes de chauffage au sol autorégulés (température de départ max. 30 °C) 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 un clapet de décharge (Illustration 6.6). Les pompes à chaleur équipées d'un dispositif de modulation peuvent fonctionner par exemple avec un seul découplage hydraulique.

Accumulateur thermique: Un accumulateur permet d'assurer notamment la transition entre les temps de délestage de l'entreprise de distribution électrique. Il peut être utile de distinguer les types d'accumulateurs suivants:
- Accumulateur technique pour la séparation hydraulique et pour garantir une fréquence d'enclenchement admissible maximale.
- Accumulateur thermique pour 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).
- Séparateur hydraulique pour découpler le circuit de chauffage du générateur thermique du circuit des consommateurs, pas de montage en série des circulateurs.

Stratégies pour le chargement de l'accumulateur
- Chargement étagé: 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. Cependant, les températures finales d'accumulation varient sensiblement, en fonction de l'état de la sortie avant la charge de l'accumulateur (Illustration 6.7).
- Chargement par stratification: Lors du chargement 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 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 (Illustration 6.8).

Remarque: Pour les petites installations, le chargement étagé s'est

imposée en tant que variante sûre sur le plan du fonctionnement et efficiente en matière énergétique. Cette variante devrait donc être mise en place pour ces installations.

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. Dans le premier cas, un accumulateur thermique n'est donc pas nécessairement obligatoire (même pour les chauffages au sol). Le temps de fonctionnement minimum pour chaque démarrage de compresseur devrait être d'environ 20 à 30 minutes.
- Un équilibrage hydraulique précis est particulièrement important pour les chauffages au sol autorégulés sans vanne thermostatique. L'idéal est de procéder à l'équilibrage hydraulique de tous les circuits de chauffage au sol dans la boucle de Tichelmann.
- 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 se faire par l'intermédiaire d'un thermosiphon, et être bien isolés (pour réduire les pertes d'accumulateur).

Modules d'eau chaude instantanée

Les modules d'eau propre sont des échangeurs de chaleur externes à plaques (ou des échangeurs de chaleur internes à serpentin), qui chauffent l'eau chaude sanitaire en continu au moment du soutirage. L'énergie nécessaire pour cela provient d'un accumulateur (Illustration 6.10). Cette solution présente des avantages essentiellement en matière d'hygiène: on ne stocke quasiment pas d'eau chaude – sauf dans les conduites de distribution. L'eau chaude

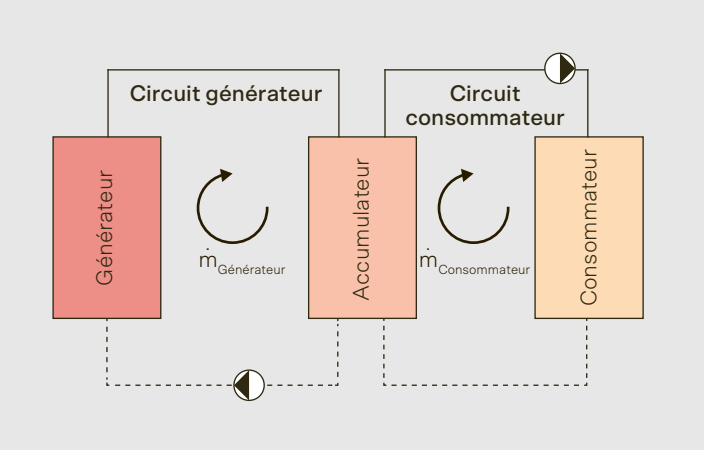


Illustration 6.6: Le débit volumique via le circuit générateur doit toujours être dimensionné plus généreusement que le circuit des consommateurs: $m_{Générateur} > m_{Consommateur}$

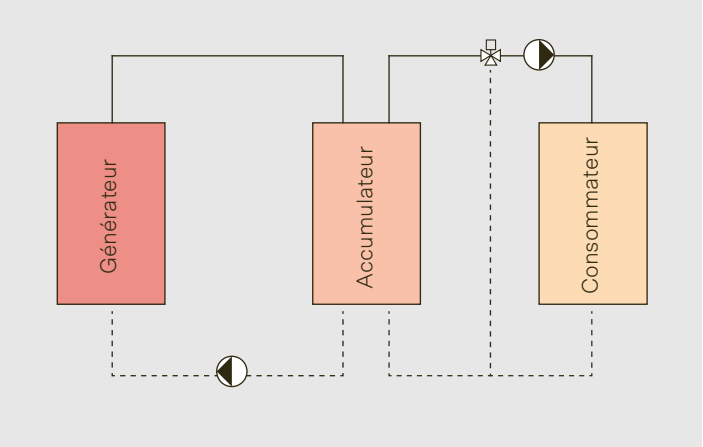


Illustration 6.7: Commande hydraulique pour le chargement étagé.

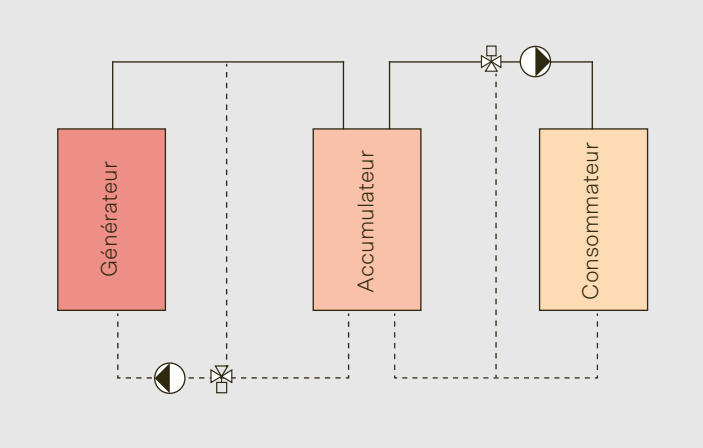
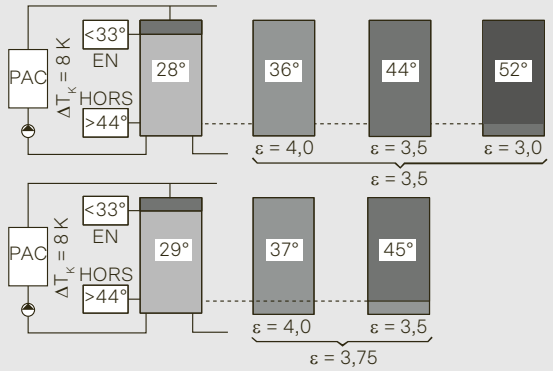


Illustration 6.8: Commande hydraulique pour le chargement par stratification.

Chargement étagé



Description
L'accumulateur est chargé par étapes en plusieurs passages avec des températures de sortie du condenseur croissantes. L'accumulateur ne peut pas être chargé à une température finale exacte. Celle-ci varie selon les différences de température à travers le condenseur.

Avantages
- Température de condensation plus basse
- Moins de frais (pas de régulation de la charge)

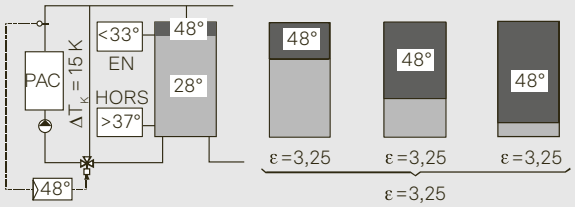
Inconvénients
- Température variable de l'accumulateur
- Variations de la température de départ lors du chargement
- Manque de capacité au premier passage
- Plus grande puissance de la pompe du condenseur
- La capacité de l'accumulateur n'est pas utilisée au maximum
- Chargement plus mauvais
- Effet négatif sur l'évaporateur (spécialement au départ!)

Débit du condenseur $\dot{V}_K$ à une puissance de condensation/chauffage Φ_K
$\dot{V}_K$ [m³/h] = 0,86 · Φ_K [kW] / ΔT_K [K]
Il faut trouver un compromis:
- Débit le plus grand possible, pour que la température du condenseur soit basse, les variations de température de l'accumulateur faibles et la capacité de l'accumulateur grande.
- Débit le plus faible possible, pour que la puissance de la pompe du condenseur soit petite.

Recommandation pour le dimensionnement de la différence de température du condenseur ΔT_{Cond}
Source de chaleur à peu près constante
- monovalent $\Delta T_{Cond} = 0{,}5 \cdot \Delta T_{dim}$
- bivalent-parallèle $\Delta T_{Cond} = 0{,}7 \cdot \Delta T_{biv}$
- bivalent-alternatif $\Delta T_{Cond} = 0{,}7 \cdot \Delta T_{biv}$

Source de chaleur fortement variable
- monovalent $\Delta T_{Cond} = 0{,}5 \cdot \Delta T_{dim}$
- bivalent-parallèle $\Delta T_{Cond} = 0{,}5 \cdot \Delta T_{biv}$
- bivalent-alternatif $\Delta T_{Cond} = 0{,}5 \cdot \Delta T_{biv}$

Chargement par stratification



ε = Coefficient de performance de la pompe à chaleur dans les conditions d'exploitation respectives
Remarque: La différence des coefficients de performance pour charge étagée et charge par stratification est moins grande que celle présentée ici, bien qu'il soit tenu compte de la consommation électrique supplémentaire de la pompe.

Description
L'accumulateur est chargé en un passage et de manière stratifiée avec une température de sortie du condenseur constante. La température de consigne du chargement peut être définie avec précision. Cette valeur peut être définie selon les conditions météorologiques.

Avantages
- Maîtrise exacte de la température de l'accumulateur
- Température constante de départ garantie
- Pas de manque de capacité
- Puissance de la pompe du condenseur plus faible
- Utilisation maximale de la capacité de l'accumulateur
- Meilleure stratification
- Pas d'effet négatif sur l'évaporateur

Inconvénients
- Température de condensation plus élevée
- Frais plus élevés (régulation de la charge)
- Efficience moindre

Débit du condenseur $\dot{V}_K$ à une puissance de condensation/chauffage Φ_K
$\dot{V}_K$ [m³/h] = 0,86 · Φ_K [kW] / ΔT_K [K]
Généralement:
- En cas de puissance à peu près constante de la source de chaleur, on peut dimensionner sur la base d'un débit minimal (si réglage selon conditions météo, un débit éventuellement plus élevé peut être utilisé).
- En cas de puissance variable de la source de chaleur, il faut en général partir avec un débit plus élevé.

Recommandation pour le dimensionnement de la différence de température du condenseur donnée ΔT_{Cond}
Source de chaleur à peu près constante
- monovalent $\Delta T_{Cond} = \Delta T_{dim}$
- bivalent-parallèle $\Delta T_{Cond} = \Delta T_{biv}$
- bivalent-alternatif $\Delta T_{Cond} = \Delta T_{biv}$

Source de chaleur fortement variable
- monovalent $\Delta T_{Cond} = 0{,}5 \cdot \Delta T_{dim}$
- bivalent-parallèle $\Delta T_{Cond} = 0{,}7 \cdot \Delta T_{biv}$
- bivalent-alternatif $\Delta T_{Cond} = 0{,}7 \cdot \Delta T_{biv}$

Température d'enclenchement T_{EN}
Afin de prévenir, du côté utilisation de chaleur, un éventuel «passage à vide» au niveau de la température de retour, T_{EN} doit être au moins aussi élevée que la température de retour maximale. Les pertes de l'accumulateur peuvent entraîner, après une longue interruption, une température de départ trop basse, ce qui normalement ne doit pratiquement rien perturber (exceptions: ventilation sans URT, chauffage de l'eau). En cas de chargement étagé, un manque de réserve temporaire dû à une température de retour trop basse durant le premier passage ne peut pas être évitée.

Température de déclenchement $T_{décl}$
$T_{décl} \leq T_{Cond,max} - \Delta T_{Cond}$ avec la condition $T_{décl} > T_{en}$ (sinon l'eau entre $T_{décl}$ et T_{en} ne peut pas sortir de l'accumulateur!) Avec l'air extérieur comme source de chaleur, ΔT_{Cond} est très variable. Il faut prendre la plus grosse valeur constatée. Lorsque la condition $T_{décl} > T_{en}$ ne peut pas être tenue, le point de déclenchement (et évent. aussi le point d'enclenchement) doit être asservi aux conditions météorologiques.

Température de chargement T_{char}
Pour que le déclenchement fonctionne, il s'applique: $T_{char} > T_{décl}$

Illustration 6.9 (page de gauche): Chargement étagé versus chargement par stratification. (Source: Ravel dans le domaine de la chaleur; Pompes à chaleur, Cahier 3, 1993)

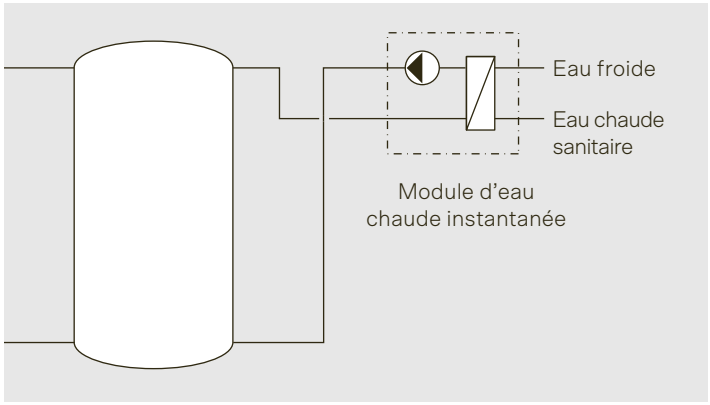
sanitaire peut ainsi être maintenue à basse température, ce qui est bénéfique pour l'efficacité de la pompe à chaleur.

Avantages
- Basses températures d'eau chaude sanitaire possibles
- Pas d'eau chaude sanitaire stagnante

Inconvénients
- Pas d'eau chaude sanitaire en cas de panne de courant
- Coûts éventuellement un peu plus élevés

Indications pour la planification
- Nécessité d'un dimensionnement minutieux selon les besoins réels
- Séparation nette des zones pour l'eau chaude sanitaire, l'eau de chauffage et le préchauffage solaire avec des vannes d'inversion dans le départ et le retour
- Siphonner les raccordements
- Respecter les débits volumiques et les vitesses d'écoulement maximums au niveau des raccords de l'accumulateur
- Intervalles de temps recommandés pour la charge d'eau chaude sanitaire (2 fois 2 heures par jour)
- Faire attention au positionnement des sondes
- Priorité eau chaude
- Attention à l'entartrage
- Protection anti-légionellose (thermique, rayonnement UV) en cas de conduites maintenues en température
- il existe des solutions contrôlées (accumulateur, système de pompe à chaleur contrôlés) qui garantissent une bonne efficacité des installations d'accumulateur combiné même dans le fonctionnement de la pompe à chaleur.

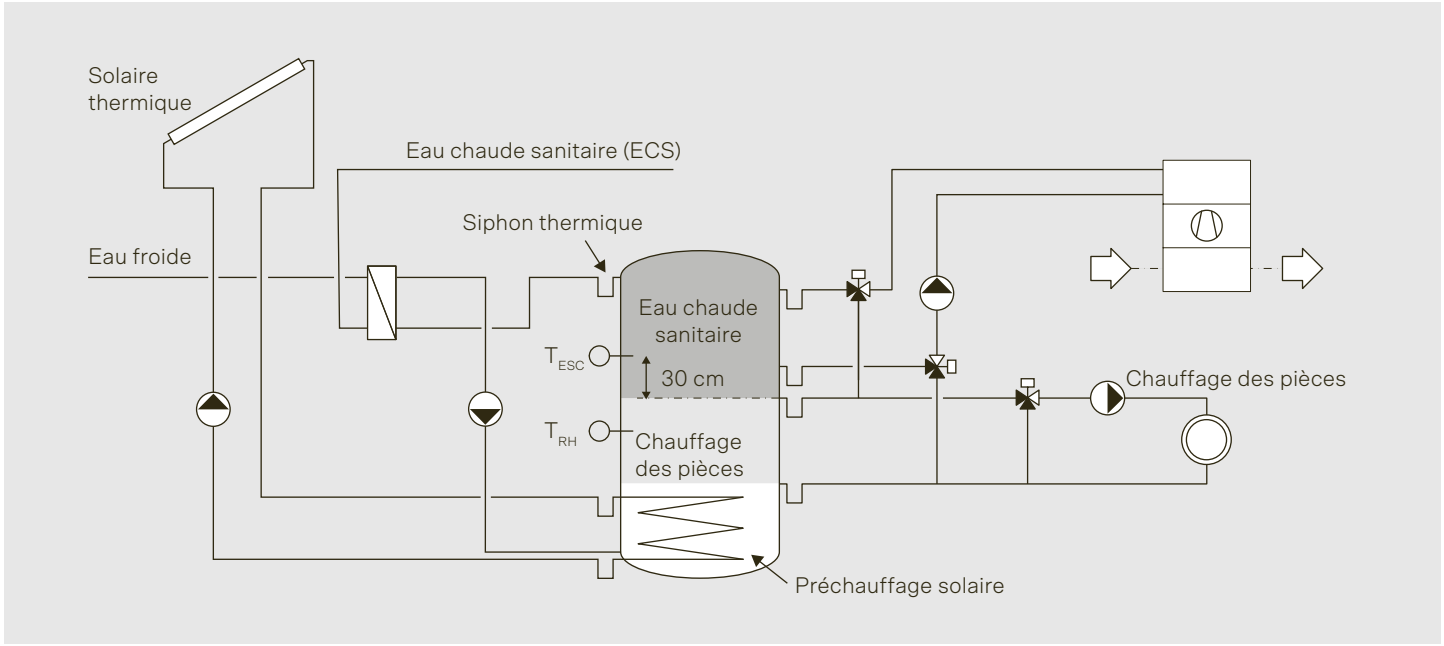
Illustration 6.10: Module d'eau propre avec intégration à l'accumulateur. La structure interne du module est représentée ici de façon simplifiée.



Accumulateur combiné

Les accumulateurs combinés sont des accumulateurs qui fournissent aussi bien l'eau de chauffage que la chaleur pour le chauffage de l'eau chaude sani-

Illustration 6.11: Accumulateur combiné et pompes à chaleur. Exemple de schéma de module d'eau chaude instantanée. L'échangeur de chaleur à plaques est reproduit ici avec une orientation de montage correcte (verticale, côté chaud dessous).

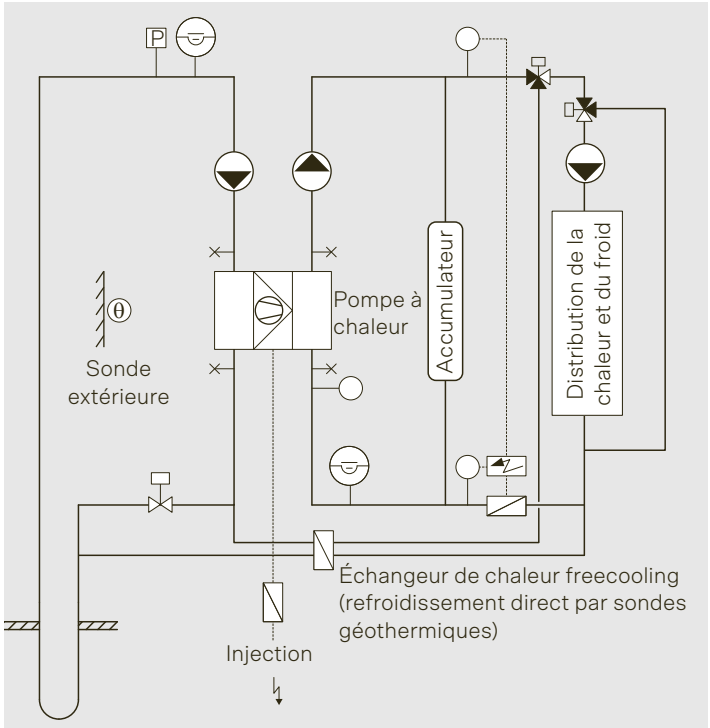


taire. Ils sont intéressants en cas d'intégration de chaleur solaire, mais aussi en raison de leur faible encombrement (par rapport aux solutions à deux accumulateurs séparés). Une attention particulière doit être accordée à l'intégration dans le système global afin de conserver la stratification de la température dans l'accumulateur et que la pompe à chaleur puisse fournir la chaleur en fonction des exigences de température effectives du consommateur. Il faut notamment tenir compte des débits volumiques maximums (maintenant la stratification) lors de la charge et de la décharge, ainsi que des conduites de circulation. Si la stratification de la température est régulièrement perturbée, les besoins en énergie augmentent considérablement.

Système hydraulique dans les installations de refroidissement passif

Refroidissement direct (passif) avec des sondes géothermiques: 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. Cela permet en même temps de régénérer le sol entourant la sonde.

Illustration 6.12: Refroidissement direct avec sondes géothermiques.



Fonctionnement: Un échangeur de chaleur à plaques est intégré dans le circuit de saumure (Illustration 6.12, freecooling). 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 suintement (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 (minimum 18 °C).

Avantages
- Construction simple
- Régénération supplémentaire du terrain
- Frais d'exploitation minimaux
- Efficience (uniquement l'électricité pour la pompe)

Inconvénients
- Puissance de refroidissement limitée

Lorsque le refroidissement passif n'est pas uniquement considéré comme un surcoût avantageux de l'installation de chauffage, la sonde géothermique doit être dimensionnée à la puissance de refroidissement requise.

Valeurs indicatives pour les puissances de refroidissement de la restitution de chaleur:
- Sonde géothermique env. 30 W/m

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

Système hydraulique avec refroidissement actif

Refroidissement par inversion du cycle dans le circuit de froid

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 régulée par une vanne de mélange 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 dans le cas de pompes à chaleur saumure-eau

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
À l'instar du refroidissement actif et passif évoqué ci-dessus concernant les sondes géothermiques, les eaux souterraines ou les eaux de surface sont également exploitables à des fins de refroidissement. Attention: respecter les températures et les obligations légales. On propose également de plus en plus des pompes à chaleur air-eau avec possibilité de refroidissement actif par inversion du cycle. L'énergie photovoltaïque convient particulièrement bien à l'entraînement d'une machine frigorifique pour le refroidissement des locaux, la charge et le rendement (rayonnement solaire) intervenant généralement simultanément.

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:
- Point de fonctionnement défini lors du dimensionnement
- Débit volumique
- Perte de charge
- Durée de fonctionnement
- Type de régulation (vitesse)

Point de fonctionnement défini lors du dimensionnement
Le point de fonctionnement choisi est déterminant pour le dimensionnement des circulateurs, c'est-à-dire le débit volumique maximal et minimal requis aux températures prescrites (et le fluide). En cas de points de fonctionnement différents (p. ex. chauffage avec vannes thermostatiques), utiliser si possible des circulateurs à vitesse de rotation variable.

Débit volumique
Le débit volumique est déterminé par le consommateur de chaleur, respectivement le générateur de chaleur (débit volumique minimum). Il est calculé selon la formule:

$$\dot{V} = \frac{\Phi}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{VL} - \theta_{RL})}$$

soit:
$\dot{V}$ = débit volumique en m^3/s
Φ = puissance thermique en W (J/s)
ρ = densité du fluide en kg/m^3
c = capacité thermique spécifique du fluide en J/(kg K)
θ = température du fluide en °C

Pour l'eau, il s'applique env.
c = 4200 J/(kg K) et ρ = 1000 kg/m^3.

Perte de charge
La perte de pression dans un circuit est déterminée par la taille (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 charge en Pa
ρ = densité du fluide en kg/m^3
g = accélération due à la pesanteur en m/s^2

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'efficience 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 de réguler le nombre de rotations des circulateurs. 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.

Indications
- Pour contrôler le dimensionnement des pompes de groupe de chauffage, il faut se baser sur une puissance électrique consommée de la pompe dans une plage de 1 ‰ de la puissance de chauffage thermique.
- La perte de charge est réduite au carré de la diminution du débit massique et l'énergie au cube de la diminution du débit massique. Exemple: moitié du débit massique → $(½)^2$ = ¼ de perte de pression → $(½)^3$ = ⅛ de besoins en énergie.

Chapitre 7

Intégration dans des systèmes photovoltaïques

7.1 Introduction

Considérée comme l'un des récepteurs majeurs dans un bâtiment, la pompe à chaleur se distingue par sa grande flexibilité et peut donc très bien se combiner avec des installations photovoltaïques. Une telle association vise principalement à optimiser la consommation propre en adaptant du mieux possible le fonctionnement de la pompe à chaleur à la production des installations photovoltaïques. De plus amples informations sont fournies par le document [4].

Indicateurs

Les indicateurs suivants sont essentiels à l'optimisation de la consommation propre:

E_{prop} Consommation propre (kWh)
$E_{résau}$ Prélèvement sur le réseau (kWh)
E_{sur} Excédent (kWh)
E_{tot} Consommation totale (kWh)
E_{prod} Production propre (kWh)

La consommation propre E_{prop} désigne la part énergétique de la consommation d'électricité produite simultanément à l'échelle locale. $E_{résau}$ indique la quantité d'électricité prélevée sur le réseau et E_{sur} celle qui est réinjectée dans ce dernier. L'Illustration 7.1 représente l'évolution caractéristique de la production d'électricité $P_{prod}(t)$ de l'installation photovoltaïque et de la consommation totale $P_{tot}(t)$ d'un bâtiment pendant une journée. Les zones situées sous les courbes correspondent aux parts énergétiques. Elles permettent de déduire les indicateurs suivants.

Le **taux d'autoconsommation** désigne le rapport entre la consommation propre E_{prop} et la production de l'installation photovoltaïque E_{prod}.

$$r_{prop} = \frac{E_{prop}}{E_{prod}} = \frac{E_{tot} - E_{réseau}}{E_{prod}} \qquad (1)$$

L'optimisation de la consommation propre vise principalement à maximiser le taux d'autoconsommation. Il est toutefois déconseillé d'optimiser unilatéralement cette valeur caractéristique. Au contraire, il est recommandé de toujours la prendre en considération en fonction des indicateurs suivants:

Le **taux d'autosuffisance** désigne le rapport entre la consommation propre E_{prop} et la consommation totale E_{tot} du bâtiment.

$$r_{aut} = \frac{E_{prop}}{E_{tot}} = \frac{E_{tot} - E_{réseau}}{E_{tot}} \qquad (2)$$

Le taux d'autosuffisance indique le degré d'indépendance du bâtiment par rapport au réseau électrique. Une forte consommation propre ne signifie pas nécessairement que le taux d'autosuffisance est important. Afin d'augmenter ce dernier, il est également indispensable de réduire la consommation d'électricité en dehors des périodes de production de l'installation photovoltaïque.

À la différence du taux d'autosuffisance, le **taux de couverture solaire de la pompe à chaleur** ne prend pas en considération l'ensemble du bâtiment et ne se réfère qu'à un seul appareil (ici la pompe à chaleur). Cet indicateur désigne le rapport entre la part d'élec-

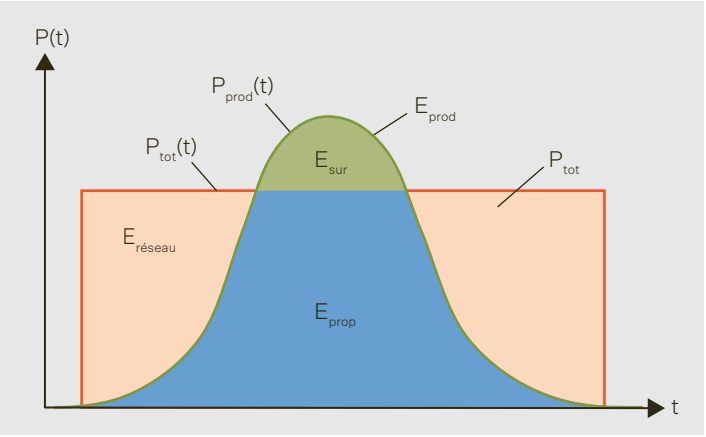


Illustration 7.1: Exemple d'évolution temporelle de la production et de la consommation pour illustrer les indicateurs. (Source: [4])

tricité solaire produite $E_{prop,PC}$ et la consommation totale E_{PC} de la pompe à chaleur.

$$r_{solaire,\,PC} = \frac{E_{prop,\,PC}}{E_{PC}} \qquad (3)$$

Ainsi, le taux de couverture solaire de la pompe à chaleur indique le degré d'indépendance de celle-ci par rapport au réseau électrique. Il permet d'évaluer l'optimisation de la pompe à chaleur de façon distincte.
Le **COP** (Coefficient of Performance) et le **coefficient de performance annuel** (COPA) permettent d'évaluer l'efficacité de la pompe à chaleur (voir Chapitre 1.2).

Il est important de toujours accorder une attention particulière à ces indicateurs lors de l'optimisation. Une optimisation unilatérale du taux d'autoconsommation au détriment de l'efficacité (notamment via des chauffages d'appoint électriques) n'est pas recommandée!

Potentiel des différents accumulateurs thermiques
Les accumulateurs thermiques qui se rechargent pendant la production d'électricité photovoltaïque avant de se décharger à nouveau ultérieurement sont utilisés lors de l'optimisation de la pompe à chaleur. Le Tableau 7.1 fournit

Construction «lourde» (capacité thermique/SRE = 0,15 kWh/m² K)
Capacité de stockage (kWh)

Majoration de température (K)	Maison individuelle			Immeuble collectif		
	Surface de référence énergétique (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	15	21	30	150	225	300
2	30	42	60	300	450	600
3	45	63	90	450	675	900

Construction «mi-lourde» (capacité thermique/SRE = 0,08 kWh/m² K)
Capacité de stockage (kWh)

Majoration de température (K)	Maison individuelle			Immeuble collectif		
	Surface de référence énergétique (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	8	11	16	80	120	160
2	16	22	32	160	240	320
3	24	34	48	240	360	480

Construction «légère» (capacité thermique/SRE = 0,03 kWh/m² K)
Capacité de stockage (kWh)

Majoration de température (K)	Maison individuelle			Immeuble collectif		
	Surface de référence énergétique (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	3	4	6	30	45	60
2	6	8	12	60	90	120
3	9	13	18	90	135	180

Accumulateur technique (capacité thermique eau = 4,19 kJ/kg K)
Capacité de stockage (kWh)

Majoration de température (K)	Maison individuelle		Immeuble collectif		
	Volume (l)				
	300	500	1000	1500	2000
5	2	3	6	9	12
10	3	6	12	17	23
15	5	9	17	26	35

Tableau 7.1: Capacité thermique des bâtiments et des accumulateurs techniques. (Source: [4])

un aperçu de la capacité de stockage thermique de la masse du bâtiment et des accumulateurs thermiques (kWh). Dans le cas des bâtiments, la norme SIA 380/1 [5] distingue les types de construction «lourde», «mi-lourde» et «légère» et indique des capacités d'accumulation spécifiques (en kWh/m²K) à cette fin. La taille du bâtiment est décrite par la surface de référence énergétique (SRE) exprimée en mètre carré et classée selon deux types de maison: les maisons individuelles et les immeubles collectifs. S'agissant de la majoration de température, il est supposé que la température ambiante moyenne soit augmentée de 1 à 3 K par rapport au stockage thermique d'énergie.
À titre de comparaison, la capacité de stockage thermique des accumulateurs techniques est estimée en fonction du volume de stockage (en litre) et de la majoration de température de 5, 10 et 15 K. Les accumulateurs techniques englobent les accumulateurs d'eau chaude sanitaire et les accumulateurs tampons.
Par ailleurs, il apparaît immédiatement évident que la masse du bâtiment présente une capacité de stockage nettement supérieure à celle des accumulateurs techniques. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'accorder la priorité au stockage d'énergie dans la masse du bâtiment. Ce stockage fait déjà ses preuves dès le type de construction «mi-lourde» avec chauffages au sol, et ce, en raison de la grande inertie du bâtiment.

Dimensionnement des accumulateurs
Les normes SIA 384/1 [4], SIA 385/1 [7], SIA 385/2 [8] et les contenus du site Internet consacré au PAC Système-Module (PAC-SM) [9] proposant des informations relatives au dimensionnement des accumulateurs [10] doivent être pris en compte au cours de ce processus. Dans le cas d'une optimisation de la consommation propre en mode chauffage, un dimensionnement classique des accumulateurs tampons se révèle suffisant, car la part de chaleur nettement supérieure peut être stockée dans le bâtiment de façon autonome. Le stockage de chaleur dans le bâtiment est une solution plus efficace en raison d'un fonctionnement avec des majorations de température moins importantes.
S'agissant de l'optimisation de la consommation propre pour la production d'eau chaude, un dimensionnement classique des accumulateurs d'eau chaude sanitaire s'avère également suffisant pour les maisons individuelles. Dans le cas des immeubles collectifs, il est toutefois recommandé de dimensionner les accumulateurs avec un facteur 1,5 à 2 fois supérieur à celui prévu par les normes. Un tel dimensionnement devrait permettre de garantir que la consommation pour une journée entière soit couverte par une seule recharge.

Comparaison du potentiel de la technique de régulation
Dans quelle mesure le taux de couverture solaire de la pompe à chaleur (voir définition plus haut) peut-il être augmenté par l'utilisation de la technique de régulation? L'Illustration 7.2 fournit un aperçu de ce potentiel en fonction de différentes stratégies de régulation (valeurs optimales tirées de la pratique). Le «taux de couverture solaire naturel» sans optimisation est supposé avoir un facteur de 1 et les augmentations relatives sont considérées.

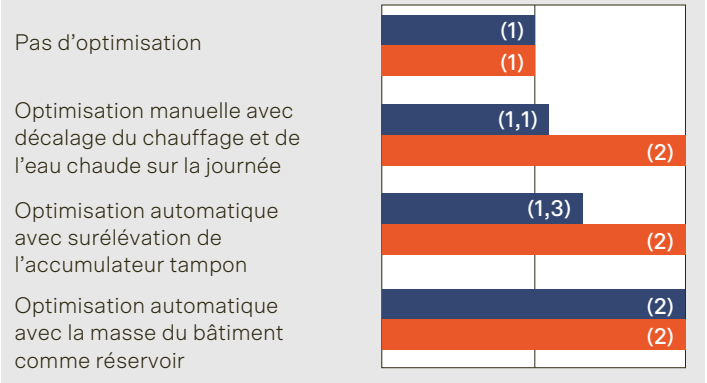


Illustration 7.2: Comparaison du potentiel d'augmentation de différentes stratégies de régulation. (Source: [4])
■ Taux de couverture solaire pour le chauffage
■ Taux de couverture solaire pour la production d'eau chaude
(n) Facteur d'augmentation approximatif

Lors de l'optimisation manuelle, les programmes horaires pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) de la pompe à chaleur sont réglés de manière ciblée sur la journée. Pour l'eau chaude sanitaire, il est ainsi possible d'augmenter fortement la production jusqu'à un facteur d'environ 2. Pour le chauffage, le taux de couverture peut être relevé d'environ 10 % par une augmentation diurne ciblée.
S'agissant de l'optimisation automatique pour le chauffage, on distingue deux cas de figure. Dans le cas de l'optimisation simple, seul l'accumulateur tampon est surélevé en cas d'excédent solaire. Cette situation entraîne une augmentation allant jusqu'à 30 %, en fonction de la surélévation de température réglée. Une telle régulation nécessite un système de gestion de l'énergie doté d'une interface entre ce dernier et la pompe à chaleur.
Dans le cas d'une optimisation automatique pour laquelle le bâtiment sert d'accumulateur, la totalité de la masse du bâtiment est utilisée activement comme un accumulateur thermique. Cette configuration suppose la présence d'un système de gestion de l'énergie combiné avec un système de gestion thermique et capable d'influencer et de surveiller les températures ambiantes. Dans ce cas, le taux de couverture solaire peut être multiplié par deux au maximum, et ce, même pour le chauffage.

7.2 Intégration de la pompe à chaleur

Le schéma de l'Illustration 7.3 représente l'intégration électrique des composants dans une maison individuelle. Un système de gestion de l'énergie (SGE) qui coordonne tous les récepteurs de manière centralisée est installé du côté du bâtiment. Il est recommandé que le SGE dispose d'interfaces ouvertes pour la commande de récepteurs typiques. En outre, il est conseillé qu'il soit facilement configurable et extensible.
Pour l'optimisation, le SGE doit impérativement prendre en compte la production de l'installation photovoltaïque (compteur photovoltaïque) et la

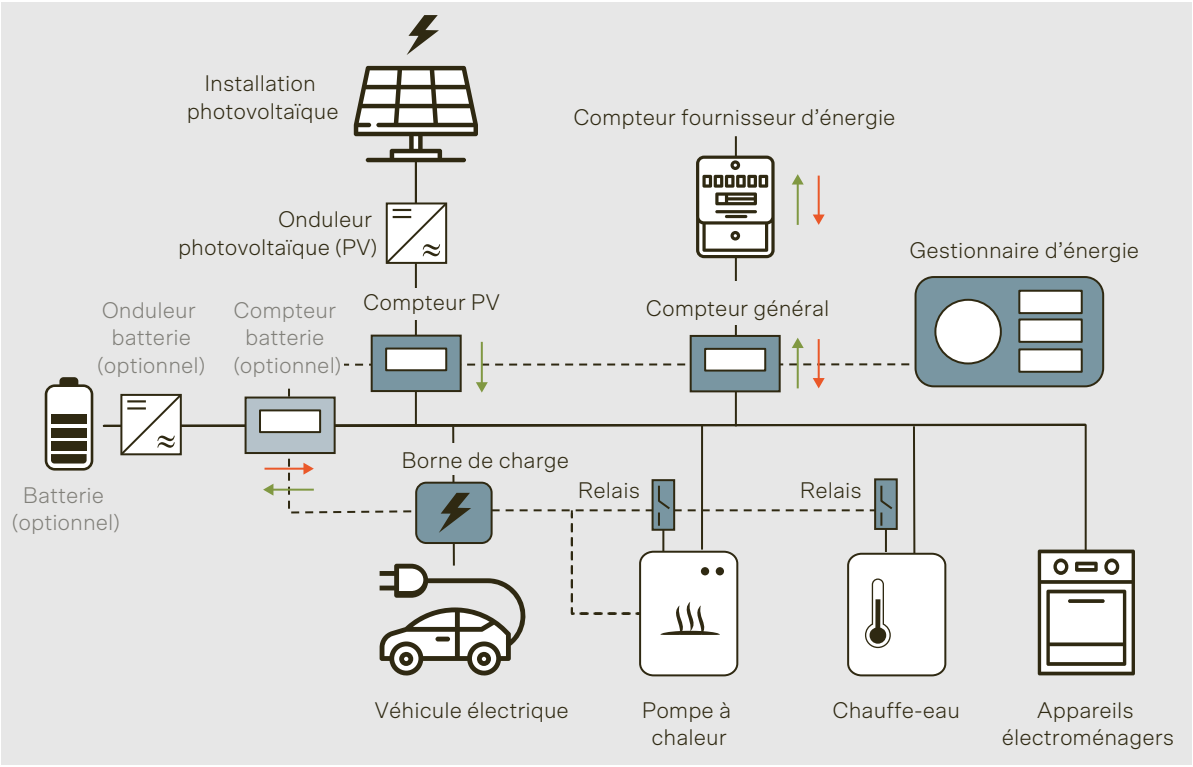


Illustration 7.3: Schéma représentant l'intégration électrique d'une pompe à chaleur dans une maison individuelle. ---- connexions de données (Source: [4])

consommation nette ou l'injection sur le raccordement d'immeuble (compteur général). Si une batterie est disponible, celle-ci doit être également mesurée par un compteur. Toutefois, il est possible de se passer de compteurs et d'utiliser des interfaces appropriées (onduleur et batterie) à la place de ces derniers. Les interfaces entre la pompe à chaleur et les compteurs des entreprises d'approvisionnement en électricité (EAE) seront disponibles sur les compteurs intelligents à l'avenir.
La pompe à chaleur est pilotée via des contacts de relais ou via une connexion à un réseau local (TCP/IP) et elle est régulée par le SGE de manière centralisée. Le chauffe-eau (p. ex. un chauffe-eau pompe à chaleur) est immédiatement intégré comme une pompe à chaleur. Dans ce cas-là, un appareil séparé pour la mesure de la consommation peut également se révéler avantageux. Les autres appareils ménagers et éventuellement les stations de recharge pour véhicules électriques peuvent être aussi commandés par le SGE centralisé.

7.3 Modes de fonctionnement des pompes à chaleur

Pour les pompes à chaleur, on distingue le fonctionnement on-off et le fonctionnement à puissance variable. Au regard des modèles conventionnels qui ne peuvent être que mis en marche ou arrêtés, les systèmes modernes Inverter offrent divers avantages grâce à une adaptation de la puissance en fonction des besoins. Les deux systèmes

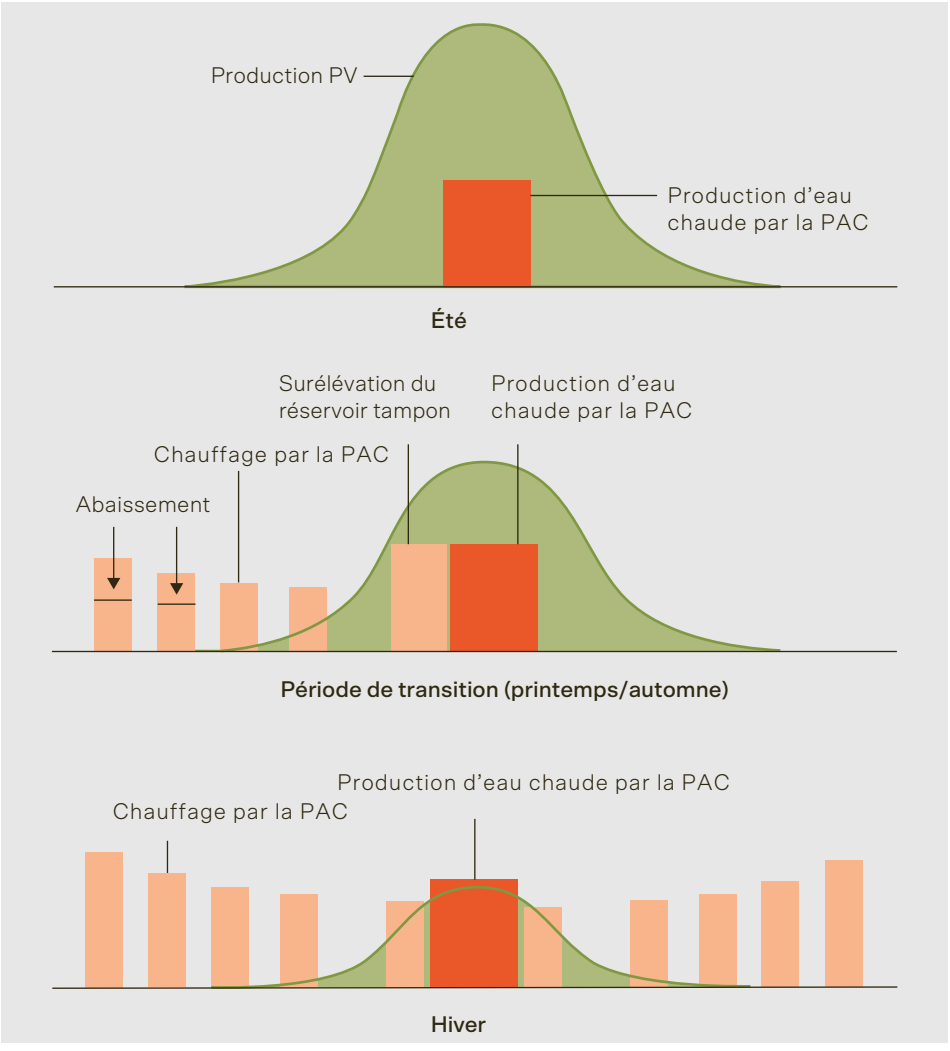


Illustration 7.4: Fonctionnement quotidien d'une pompe à chaleur on-off à différentes périodes de l'année. (Source: [4])

peuvent être utilisés pour optimiser la consommation propre, les systèmes Inverter étant pour leur part plus flexibles, car la puissance peut être mieux adaptée à la production en cours. L'Illustration 7.4 représente le fonctionnement d'une pompe à chaleur on-off au cours d'une journée et lors de différentes saisons. Les graphiques proposés prennent en compte la puissance électrique absorbée de la pompe à chaleur et la production photovoltaïque. Il est intéressant d'observer l'opposition entre production et consommation, et ce, quelle que soit la période analysée (saison ou journée). En été, seule la production d'eau chaude revêt un caractère important. En hiver, il est également nécessaire de chauffer en dehors des périodes de production d'électricité photovoltaïque pour des raisons liées au confort. Dans l'ensemble, le potentiel d'optimisation est le plus important pendant la période de transition, car la production et la consommation s'équilibrent à peu près. Dans le cas de l'optimisation photovoltaïque, l'objectif consiste à décaler les périodes de fonctionnement de la pompe à chaleur pendant la journée, dans la mesure du possible. En outre, la puissance électrique absorbée augmente durant la journée en raison de la hausse des températures de stockage.

Charge d'eau chaude pendant la journée

Une seule fenêtre de charge pendant la journée permet de maximiser le taux de couverture solaire de la production d'eau chaude (Illustration 7.5). Pour des raisons d'efficacité et de rentabilité, il est recommandé que l'accumulateur d'eau chaude soit rechargé en premier lieu par la pompe à chaleur, et non par des inserts électriques. Les pompes à chaleur actuelles sont dimensionnées pour des charges d'eau chaude quotidiennes à des températures comprises entre 55 et 60 °C. La fenêtre de charge est programmée via le régulateur de la pompe à chaleur ou le système de gestion de l'énergie.

Les inserts électriques peuvent être utilisés dans des cas exceptionnels si la pompe à chaleur n'atteint pas la température d'eau chaude requise. Afin d'éviter toute consommation d'électricité inutile, il est recommandé de les activer chronologiquement après la pompe à chaleur. D'une manière générale, ce point s'applique également aux inserts électriques «intelligents» à puissance variable. Toutefois, ils pourront également servir à soulager le réseau électrique avant les pics d'injection excessifs de l'été (écrêtement des pointes, peak shaving). Dans de tels cas, il importe peu de savoir si ces

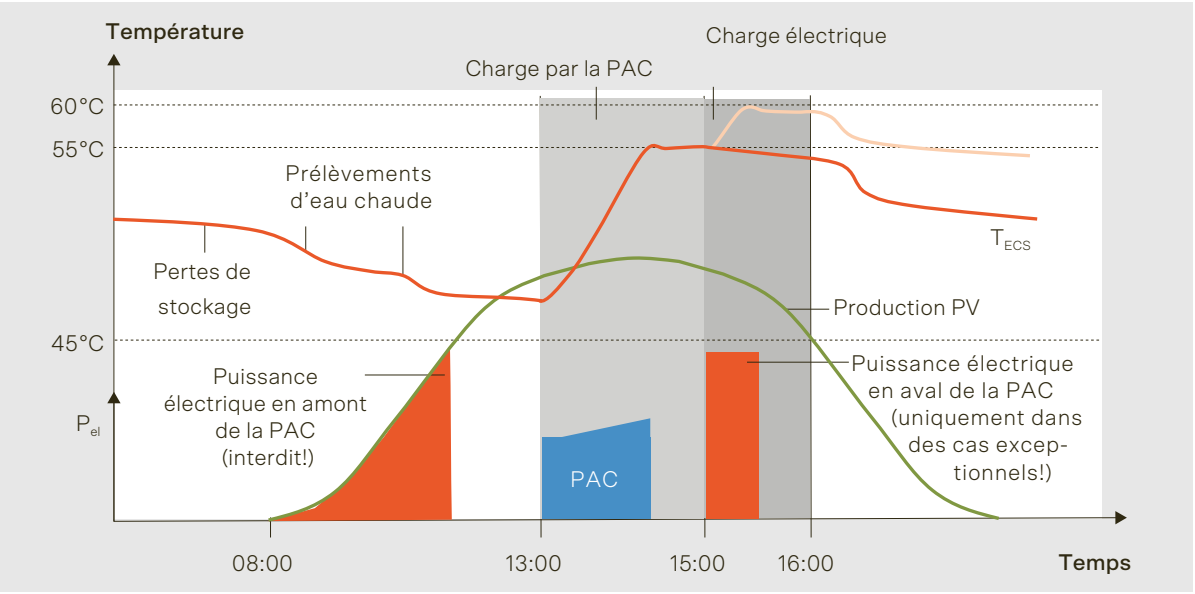


Illustration 7.5: Recharge d'eau chaude pendant la journée avec une pompe à chaleur et, dans des cas exceptionnels, avec un insert électrique. (Source: [4])
T_{ECS} = température de l'eau chaude dans le réservoir
P_{el} = puissance électrique

inserts sont mis en marche avant ou après la pompe à chaleur.

Chauffage: abaissement nocturne vs. augmentation diurne

Dans le cas d'une optimisation manuelle, une augmentation diurne peut être mise en œuvre dans la régulation du chauffage (Illustration 7.6). Ainsi, la température de départ est augmentée pendant la journée. Ce processus décale le fonctionnement de la pompe à chaleur vers les périodes de la journée où les températures extérieures sont plus élevées et où celle-ci fonctionne d'une manière plus efficace. En outre, la pompe à chaleur peut ensuite utiliser l'électricité autoproduite par l'installation photovoltaïque. Dans le cas particulier des pompes à chaleur air/eau, l'augmentation diurne permet d'améliorer le COP.

D'un point de vue physique, l'augmentation diurne exploite la masse d'accumulation thermique du bâtiment. Par conséquent, les bâtiments de construction massive avec chauffage au sol présentent un caractère optimal. Leur inertie thermique garantit que la majoration de température influe sur la température ambiante ressentie avec un certain décalage dans le temps, ce qui produit un effet positif sur le confort.

Afin d'éviter une surchauffe pendant la période de transition, il est recommandé de régler l'augmentation diurne d'une façon prudente et progressive. Par ailleurs, une commande de l'augmentation diurne via la surveillance intégrée de la température ambiante d'un système de gestion de l'énergie constitue une solution encore plus avantageuse.

L'augmentation diurne peut être directement programmée sur le régulateur de la pompe à chaleur manuellement. Dans l'hypothèse d'une courbe de chauffe réglée de manière optimale (conception), la programmation de l'augmentation diurne s'effectue selon la procédure suivante:

1. Les périodes programmées pour le mode confort doivent être définies en fonction des périodes de production d'électricité photovoltaïque habituelles (p. ex. de 10 à 20 heures). La pompe à chaleur fonctionne en mode éco en dehors des périodes programmées.
2. La température du mode confort doit être augmentée de 2 à 3 K environ par rapport à la température de conception.
3. La température du mode éco doit être abaissée de 1 K environ par rapport à la température de conception.

Il est important que la valeur de consigne pour la température de départ demeure identique à la température de conception.

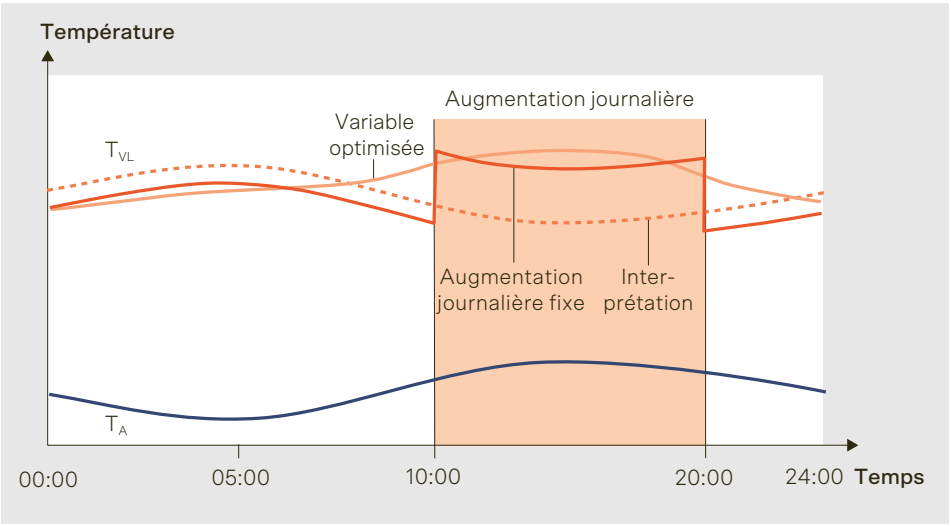


Illustration 7.6: Courbes de température avec augmentation diurne. (Source: [4])
T_D = température de départ
T_E = température extérieure

Si un système de gestion de l'énergie est disponible, l'augmentation diurne peut être automatiquement régulée via celui-ci. Le cas échéant, la course de température devrait pouvoir être définie d'une manière similaire à celle mentionnée précédemment. Le système de gestion de l'énergie ne permet toutefois pas d'activer l'augmentation diurne à des périodes de programmation fixes. En effet, une telle activation ne s'effectue qu'en fonction de la production d'électricité photovoltaïque.

7.4 Interfaces

Les systèmes de gestion de l'énergie (SGE) communiquent avec les pompes via une interface. Celle-ci permet d'influer sur les conditions d'exploitation ou sur les paramètres de l'installation de pompe à chaleur. Ainsi, il est notamment possible de procéder à une augmentation ciblée des températures de stockage dans le cas d'une production excédentaire d'électricité photovoltaïque, d'après l'Illustration 7.7 représentant une intégration hydraulique classique.
Les SGE simples influent uniquement sur les températures des accumulateurs techniques (accumulateurs tampons et accumulateurs d'eau chaude). Les systèmes équipés d'un dispositif de gestion thermique peuvent agir quant à eux sur l'ensemble du bâtiment, surveillance de la température ambiante comprise. Dans le cas des pompes à chaleur Inverter, certains fabricants permettent également une influence externe sur la puissance en autorisant la modification de la vitesse du compresseur, mais uniquement dans la zone définie en usine.
Le Tableau 7.2 fournit un bref aperçu des interfaces possibles. Dans le cas du PAC Système-Module (PAC-SM), les interfaces ouvertes SGReady BWP ou SmartGridready sont recommandées. Ces interfaces ne requièrent plus aucune autorisation individuelle [11].
Le nouveau standard SmartGridready prend en charge toutes les interfaces physiques mentionnées dans le Tableau 7.2. Il simplifie une interaction fluide entre les SGE et les pompes à chaleur. Ce point a également des conséquences positives sur la planification et la mise en service des installations. Ce standard est abordé d'une façon plus approfondie dans la section SmartGridready du chapitre 7.5.

7.5 Perspectives

SmartGrid et gestion de la flexibilité
L'intégration du système local de gestion de l'énergie dans le réseau électrique supérieur va jouer un rôle d'une importance capitale à l'avenir. Cette approche de type SmartGrid va rendre le réseau électrique intelligent. Elle va notamment permettre de soulager ce dernier en autorisant une commande ciblée des charges. Par

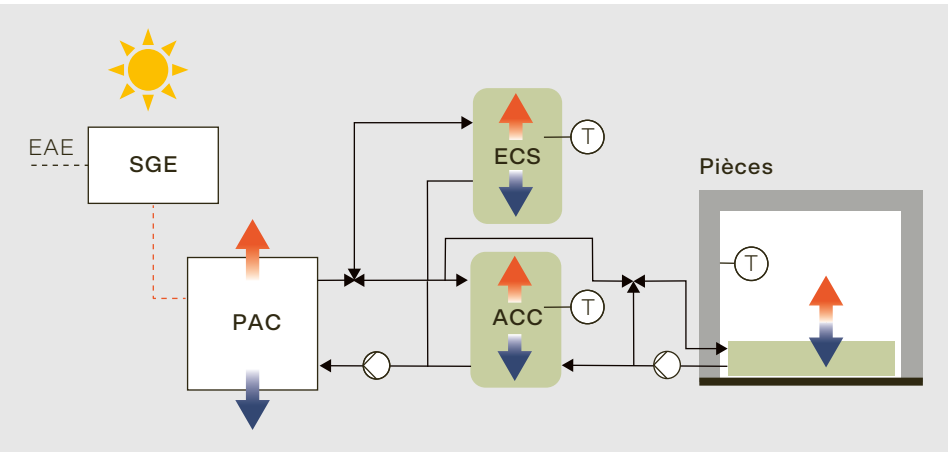


Illustration 7.7: Intégration d'une pompe à chaleur (PAC) et influence des températures de stockage. (Source: [4])
ACC = réservoir tampon
ECS = réservoir d'eau chaude

Interface	Finalité et possibilités
Contact de délestage (EAE)	Cette interface permet à l'entreprise d'approvisionnement en électricité (EAE) de verrouiller ou de déverrouiller la pompe à chaleur via un signal de télécommande centralisée. Chaque pompe à chaleur dispose de cette interface, même les modèles plus anciens. Cependant elle ne convient pas totalement aux SGE. Afin d'éviter toute perte de confort, il serait nécessaire de mettre en œuvre une surveillance de la température ambiante.
SGReady BWP	Cette interface a été initialement conçue par l'association allemande des pompes à chaleur (Bundesverband Wärmepumpe, BWP) pour les fournisseurs d'énergie afin de pouvoir piloter ces dernières au service du réseau. La spécification définit 4 niveaux qui sont commandés via 2 entrées de relais: «verrouillage», «déverrouillage», fonctionnement «à la demande» et «contrainte». À l'heure actuelle, la plupart des SGE utilisent cette interface afin d'optimiser la consommation propre locale. Cependant l'absence de retour concernant l'état de la pompe à chaleur constitue un inconvénient. En outre, les paramètres de la pompe à chaleur doivent être réglés de sorte qu'elle comprenne les signaux SGReady et qu'elle les convertisse correctement.
Entrée PV	Cette interface a été conçue par certains fabricants de pompes à chaleur afin de permettre une commande simple via l'onduleur ou le SGE. Elle ne dispose que d'une seule entrée de relais et elle peut proposer 2 niveaux: un «fonctionnement normal» et un «fonctionnement PV». La simplicité de son intégration constitue l'un de ses avantages. Toutefois, tous les fabricants ne proposent pas une telle interface et celle-ci n'émet aucun retour concernant l'état de la pompe à chaleur.
Modbus/TCP	La communication est ici établie par voie numérique via le protocole Modbus. Dans le cas de la variante Modbus/TCP, la pompe à chaleur est intégrée via un câble de réseau local et l'échange de données repose ensuite sur le protocole IP. Les registres du protocole Modbus permettent de régler l'ensemble des paramètres et des valeurs de consigne de la pompe à chaleur. Ainsi, il est possible de définir notamment des températures de consigne variables pour les différents accumulateurs ou circuits de chauffage. La communication bidirectionnelle permet au SGE de recevoir également un retour détaillé concernant l'état de la pompe à chaleur. Un SGE est impérativement nécessaire à une commande correctement exécutée. Étant donné que les registres du protocole Modbus sont spécifiques à chaque fabricant, il est absolument indispensable de clarifier la compatibilité du SGE et de la PAC au préalable. Les listes de compatibilité peuvent être consultées auprès des fabricants.

Tableau 7.2: Interfaces pour la connexion des pompes à chaleur au système de gestion de l'énergie.

conséquent, il sera possible de réduire les puissances de raccordement et de faire également baisser les coûts de développement du réseau.
Les pompes à chaleur auront un rôle important à jouer, car elles occasionnent des charges considérables qui pourront être toutefois pilotées de manière flexible. La mise en commun («pooling») de nombreuses installations permettra de stocker l'énergie dans les bâtiments en heures creuses et de réduire la puissance de référence (écrêtement des pointes, peak shaving). Les signaux de prix dynamiques dans le tarif

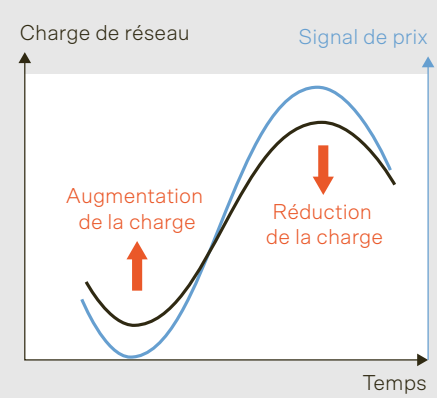


Illustration 7.8: Concept d'écrêtement des pointes (peak shaving) dans le réseau électrique. Les charges importantes comme les pompes à chaleur seront exploitées au service du réseau à l'avenir.

Niveau	Désignation	Description
1	Activation et désactivation	Commutation entre deux états de fonctionnement discrets. Ce niveau correspond au délestage EAE appliqué jusqu'à présent.
2	Divers modes de fonctionnement discrets	Commutation entre plusieurs états de fonctionnement discrets. Ce niveau correspond à l'interface SGReady BWP mise en œuvre jusqu'à présent [12].
3	Caractéristiques fixes	Activation de différentes caractéristiques fixes. Ce niveau s'applique surtout aux onduleurs et moins aux pompes à chaleur.
4	Valeurs de consigne dynamiques	Définition de valeurs de consigne continues. Dans le cas des pompes à chaleur, ce niveau permet de procéder à une commande dynamique des températures de consigne. Ainsi, il est possible de surélever des accumulateurs techniques et d'utiliser le bâtiment à des fins de stockage thermique. Dans le cas des pompes à chaleur Inverter, ce niveau permettra également de procéder à une commande dynamique de la puissance à l'avenir.
5	Caractéristiques variables	Définition de paramètres de régulation continus ou de valeurs de caractéristique continues. Ce niveau s'applique surtout aux onduleurs et moins aux pompes à chaleur.
6	Prévisions	Les prévisions de production et de consommation permettent de définir de nouveaux paramètres de régulation et de nouvelles valeurs de consigne ou des valeurs de caractéristique et même d'intégrer un jumeau numérique. Avec ce niveau, il sera également possible d'exploiter la flexibilité des pompes à chaleur de manière optimale. Les prévisions de consommation et les signaux de prix dynamiques pourront être définis, et ce, notamment sous la forme de prévisions à un jour.
m	Surveillance	Application de la surveillance: elle peut être combinée avec les niveaux supérieurs. Dans le cas d'une pompe à chaleur, ce niveau permet de lire toutes les grandeurs internes importantes, telles que les températures, les états de fonctionnement, etc.

Tableau 7.3: Modèle progressif de SmartGridready.

de l'électricité créeront un effet d'incitation en conséquence.

SmartGridready
Désormais, les systèmes de gestion de l'énergie, les pompes à chaleur et d'autres produits peuvent être certifiés SmartGridready [12]. Ce standard garantit une communication fluide entre les composants certifiés et par conséquent une coordination optimale des interfaces. Pour ce faire, les différents protocoles des fabricants sont saisis par des descriptions d'interfaces numériques (External Interface Descriptions, EID) qui peuvent être entrées dans le système de gestion de l'énergie. Une liste des produits certifiés peut être consultée via une bibliothèque disponible en ligne [13]. Dans SmartGridready, les interfaces sont couvertes par le modèle progressif présenté dans le Tableau 7.3.

7.6 Sources

[4] Wärmepumpen, Photovoltaik und Elektromobilität. Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH). SuisseEnergie, 2023
[5] Norme SIA 380/1: Calcul des besoins de chaleur pour le chauffage, SIA Zurich, 2016
[6] Norme SIA 384/1: Installations de chauffage dans les bâtiments – Bases générales et performances requises, SIA Zurich, 2009 (nouveau prSIA 384/1 en cours de préparation)
[7] Norme SIA 385/1: Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases générales et exigences, SIA Zurich, 2020
[8] Norme SIA 385/2: Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Besoins en eau chaude, exigences globales et dimensionnement, SIA Zurich, 2015
[9] PAC Système-Module: www.pac-systeme-module.ch
[10] Wärmepumpen-System-Modul – Speicher Dimensionierungsvorgaben im WPSM-Pflichtenheft mit und ohne Eigenstromnutzung, août 2018
[11] PAC Système-Module – Cahier des charges PAC+PV (exemption de l'autorisation individuelle), GSP/ICS, novembre 2022
[12] SmartGridready – Label pour une communication sûre et standardisée entre les produits, les systèmes, les installations et les réseaux électriques, smartgridready.ch
[13] SmartGridready Library (base de données des déclarations contenant les produits actuels), library.smartgridready.ch

Chapitre 8

Acoustique et protection contre le bruit

8.1 Valeurs limites légales

Immissions du bruit dans le voisinage
En Suisse, l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) réglemente la détermination et l'évaluation des immissions du bruit en extérieur à l'aide de valeurs limites d'exposition (Tableau 8.1). Les immissions du bruit causées par les pompes à chaleur sont évaluées conformément à l'annexe 6 de l'OPB. Le niveau d'évaluation (L_r; voir Illustration 8.1), exprimé en dB(A) et déterminé au milieu des fenêtres ouvertes des pièces sensibles au bruit, sert de valeur d'évaluation. Pour les nouvelles installations fixes ou le remplacement des installations existantes (OPB, article 7), les valeurs de planification sont déterminantes. Le degré de sensibilité II (DS II) s'applique aux zones où aucune entreprise gênante n'est autorisée, notamment dans les zones d'habitation ainsi que dans celles réservées à des constructions et installations publiques. Le degré de sensibilité III est valable dans les zones où sont admises des entreprises moyennement gênantes, notamment dans 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. Concernant les installations techniques, l'OPB se réfère à la norme SIA 181 (Tableau 8.2). Lors 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.

Degré de sensibilité (DS)	Valeur de planification L_r en dB(A)		Valeur limite d'immission L_r en dB(A)		Valeur d'alarme L_r en dB(A)	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
I (zone de détente)	50	40	55	45	65	60
II (zone d'habitation)	55	45	60	50	70	65
III (zone mixte)	60	50	65	55	70	65
IV (zone industrielle)	65	55	70	60	75	70

Tableau 8.1: Valeurs limites d'exposition pour le bruit de l'industrie et des arts et métiers conformément à l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (niveau d'évaluation L_r au lieu d'immission). En font également partie les installations de chauffage, de ventilation et de climatisation.

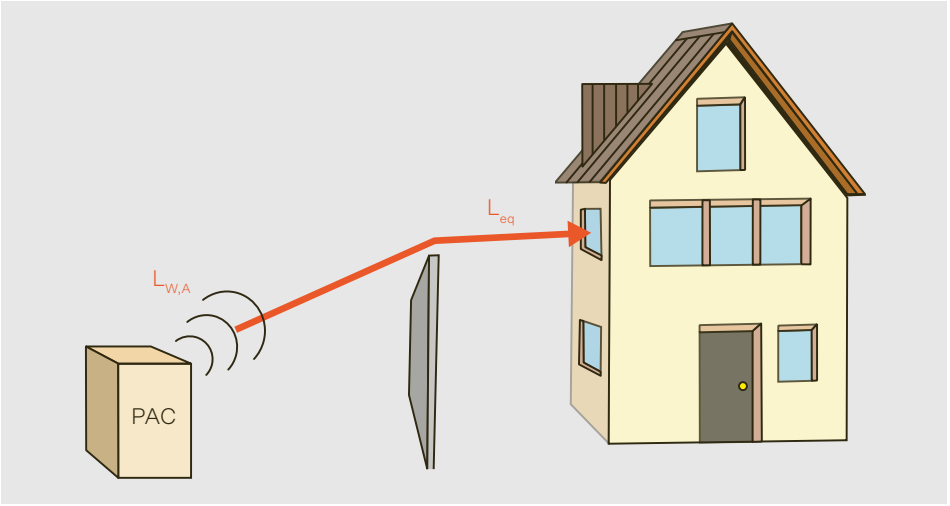


Illustration 8.1: $L_{W,A}$ est l'intensité sonore à la source. L_{eq} est le niveau moyen (niveau de pression acoustique), mesuré dans une fenêtre ouverte. L_r est le niveau d'évaluation (L_{eq} compte tenu des corrections de niveau).

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.
Dans le cadre de la procédure d'autorisation, le certificat de protection contre le bruit pour les pompes à chaleur air-eau de Cercle Bruit, le groupement des responsables cantonaux de protection contre le bruit, revêt une importance particulière. Les pompes à chaleur saumure-eau et eau-eau ne posent généralement pas de problème en matière d'émissions de bruit extérieur.
Le certificat suit le principe de précaution selon lequel les émissions doivent être limitées dans la mesure du possible. Les mesures suivantes sont prises en compte:

- Choix d'une installation dotée d'un faible niveau sonore $L_{W,A}$
- Lieu d'installation du ou des composants bruyants de l'installation
- Isolation phonique de tout type
- Éventuelles directives opérationnelles

À partir des données d'émission sonore de l'appareil (du niveau sonore $L_{W,A}$), le niveau d'évaluation est déterminé en tenant compte des mesures susmentionnées et est comparé à la valeur de planification déterminante (Tableau 8.1).

Tableau 8.2: Exigences minimales posées à la protection contre les bruits des installations techniques dans le bâtiment (norme SIA 181).

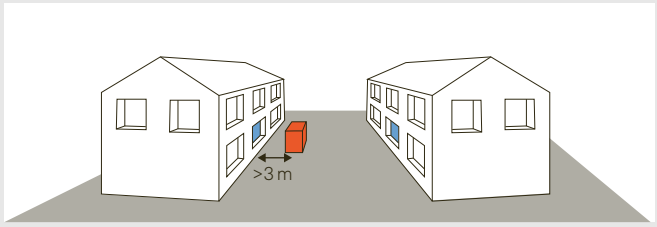
Type de bruit côté émission (local d'émission)	Bruits isolés		Bruits permanents
	Bruits liés au fonctionnement	Bruits liés à l'utilisation	Bruits liés au fonctionnement ou à l'utilisation
Sensibilité au bruit	**Valeurs exigées L_H**		
faible	38 dB(A)	43 dB(A)	33 dB(A)
moyenne	33 dB(A)	38 dB(A)	28 dB(A)
élevée	28 dB(A)	33 dB(A)	25 dB(A)

Remarques concernant le tableau: Exigences plus élevées pour la protection contre les bruits des installations techniques dans le bâtiment. Il s'applique des valeurs réduites de 4 db(A). 25 dB(A) représentant la valeur la plus faible.

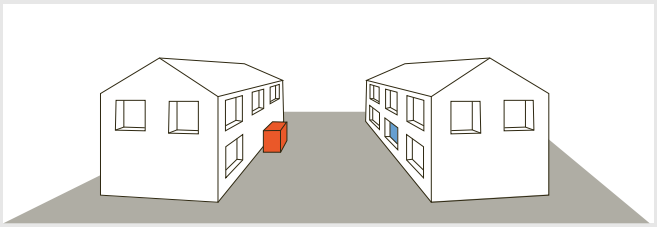
Le lieu d'installation de la pompe à chaleur (ou de ses composants bruyants) représente également un facteur d'influence important: d'un côté, une plus grande distance réduit les effets sonores au niveau du site sensible au bruit, d'un autre côté la situation de l'installation influence sensiblement la répartition du bruit du fait de la directionalité (Illustration 8.2). Le choix du lieu d'installation optimal doit donc être soigneusement étudié bien en amont.

8.2 Réduction du bruit

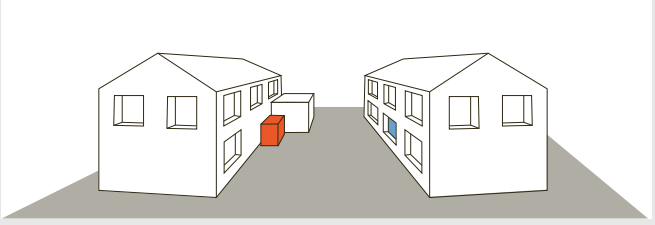
Lors de la planification d'installations de pompe à chaleur, une évaluation soigneuse des émissions sonores est nécessaire. Lorsque les mesures de réduction du bruit sont prises en compte très tôt dans le processus de développement, les coûts supplémentaires qui en résultent peuvent être réduits à un minimum. À l'inverse, des



Indépendant +3 dB
(aucun mur à moins de 3 mètres)



Au mur +6 dB



Angle rentrant +9 dB

Illustration 8.2: La valeur L_{eq} dépend notamment du lieu de placement de la pompe à chaleur. Dans la situation ci-dessus, la directionnalité entraîne une augmentation du niveau sonore de 3 dB(A), de 6 dB(A) contre le mur et de 9 dB(A) à l'angle. (Source: Cercle Bruit)

mesures mises en œuvre ultérieurement impliquent souvent une dépense supplémentaire extrêmement élevée et exigent beaucoup d'efforts.

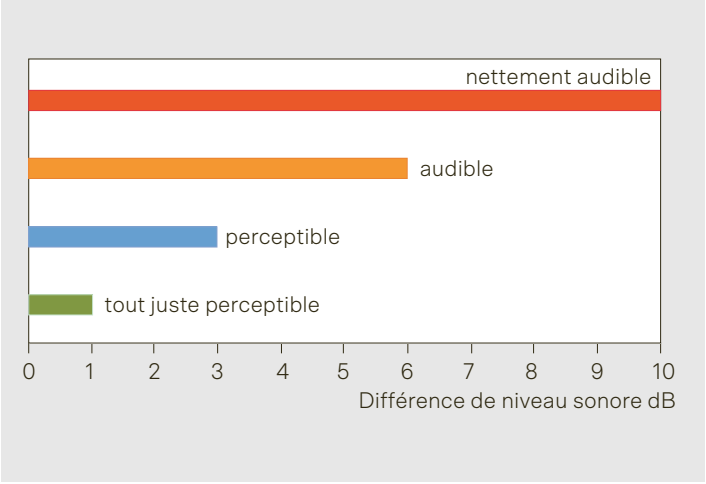
Causes du bruit

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.

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 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.

Illustration 8.3: Il faut une modification de 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; à partir de 3 dB (nettement audible) elle est perceptible.



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

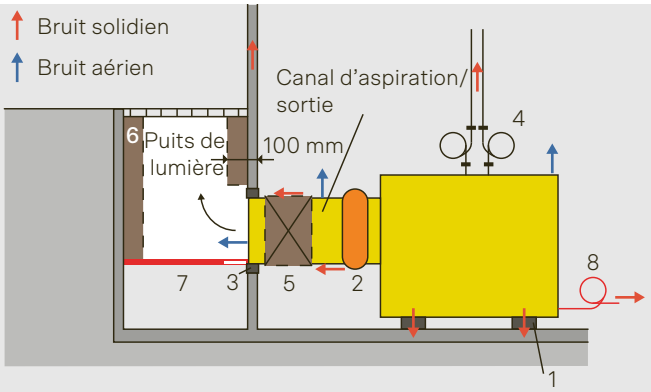
Tableau 8.3: Valeurs typiques pour la pression acoustique que l'ouïe peut percevoir sur une plage extrêmement grande.

Niveau sonore	Pression acoustique	Exemple de source de bruit
170 dB		Fusil d'assaut
160 dB	2 000 000 000 µPa (2 kPa)	Pistolet 9 mm
150 dB		Cloueuse
140 dB	200 000 000 µPa (200 Pa)	Avion à réaction (banc d'essai)
130 dB		
120 dB	20 000 000 µPa (20 Pa)	Seuil de douleur
110 dB		Marteau-piqueur
100 dB	2 000 000 µPa (2 Pa)	Discothèque
90 dB		Chaîne de montage
80 dB	200 000 µPa (200 mPa)	Trafic routier
70 dB		Conversation
60 dB	20 000 µPa (20 mPa)	Bureau
50 dB		Séjour
40 dB	2000 µPa (2 mPa)	Salle de lecture
30 dB		Chambre à coucher
20 dB	200 µPa	Studio radiophonique
10 dB		
0 dB	20 µPa	Seuil d'audibilité

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

La révision de l'ordonnance sur la protection contre le bruit explicite le rapport coût/bénéfice dans l'article 7, alinéa 3. Cette disposition indique des mesures préventives supplémentaires et leurs conditions d'application spécifiques. Si les valeurs de planification sont respectées, ces mesures supplémentaires seront alors considérées comme proportionnées uniquement si les émissions peuvent être réduites d'au moins 3 décibels (dB) moyennant au plus 1 % des coûts d'investissement de l'installation. Toutes les mesures de réduction du bruit présentées dans l'Il-



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 d'air (le soufflet ne doit pas être étiré)
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

Illustration 8.4: Mesures de réduction du bruit. (Source: «Isolation acoustique lors de l'installation de pompes à chaleur», éditeur GSP)

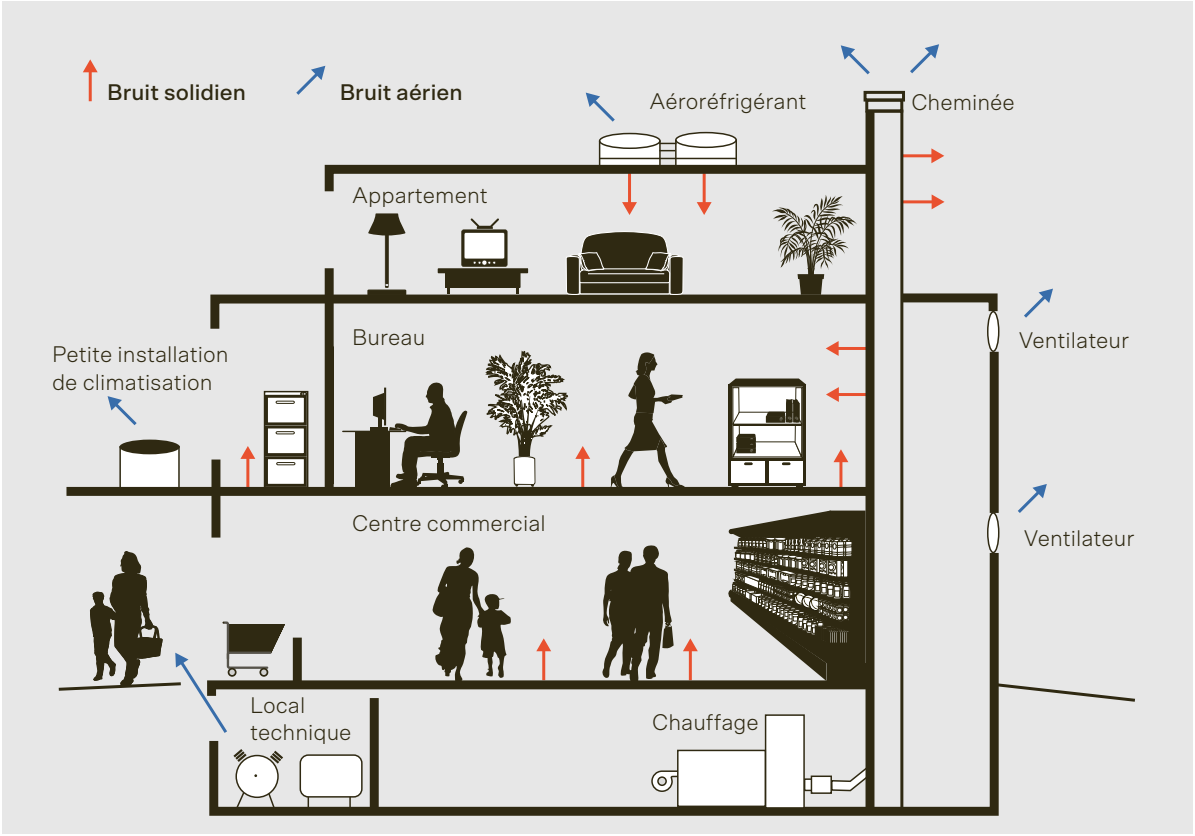


Illustration 8.5: Bruit solidien et bruit aérien à l'exemple d'un bâtiment d'habitation et d'un bâtiment commercial équipés d'installations techniques. (Source: Merkblatt Lärmbegrenzung bei Haustechnikanlagen, Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt)

Sources	Voies de transmission	Solutions possibles
Pompes à chaleur Machines frigorifiques (placement intérieur/unité intérieure appareils split)	– Bruit solidien des compresseurs: par les fondations, conduites de chauffage et câbles électriques – Bruit aérien des ventilateurs: par les ouvertures d'aspiration et d'évacuation d'air	– Choisir des appareils plus silencieux – Optimiser l'emplacement – Amortisseur de bruit – Isolation phonique des canaux d'air – Passage des conduites (déviation) – Boîtier, carrosserie, répartition des espaces – Socle, roulements élastiques
Pompes à chaleur Machines frigorifiques (placement à l'extérieur)	– Bruit aérien des compresseurs et ventilateurs: par les ouvertures d'aspiration et d'évacuation d'air, resp. les boîtiers – Bruit solidien des compresseurs: par les conduites de chauffage	– Choisir des appareils plus silencieux – Optimiser l'emplacement – Éléments d'isolation phonique élastiques sous la pompe à chaleur – Séparation du socle et des fondations du bâtiment – Montage et passage des conduites de chauffage et de fluide frigorigène – Encapsulation partielle ou complète – Blocage des régimes supérieurs (mode silencieux)
Condenseur/évaporateur refroidis à l'air (unité extérieure, appareils split)	– Bruit aérien des ventilateurs – Bruit solidien des compresseurs: par les conduites de fluide frigorigène	

Tableau 8.4: Bruit et réduction du bruit dans les installations de pompe à chaleur – sources et solutions.

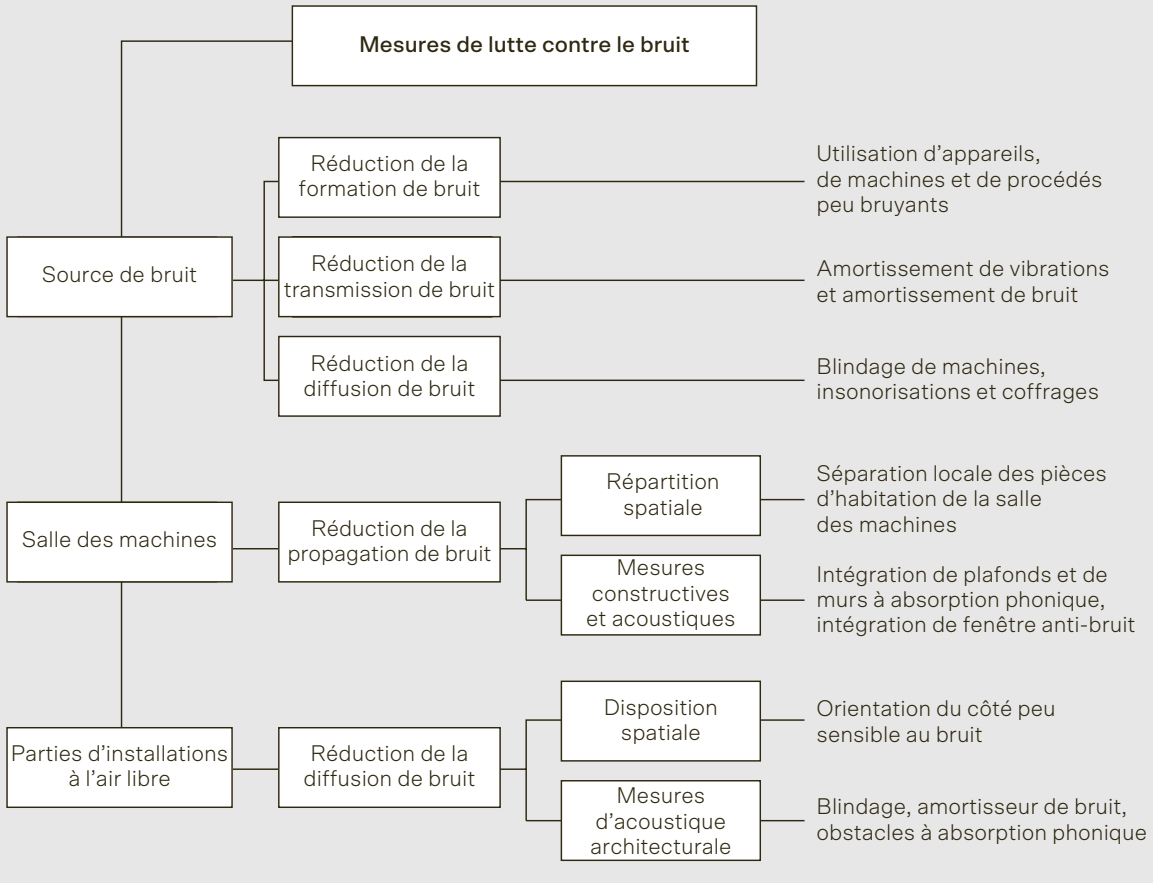


Illustration 8.6: Mesures de réduction du bruit. (Source: Merkblatt Lärmbegrenzung bei Haustechnikanlagen, Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt)

lustration 8.4 doivent être prises en compte lors de la planification et de la réalisation. Comme le montre l'Illustration 8.5, on distingue le bruit solidien du bruit aérien. En général, on ramène facilement le bruit solidien sous les valeurs limites avec un socle d'appareil adapté et des amortisseurs de vibrations bien dimensionnés. En ce qui concerne le bruit aérien, les composants de l'installation, tels que les ventilateurs et les compresseurs par exemple, doivent être dimensionnés ou sélectionnés en fonction des valeurs souhaitées. Dans les bâtiments, c'est surtout la nuit que le bruit aérien peut poser problème (Tableau 8.4). L'Illustration 8.6 est une liste de contrôle des mesures de réduction du bruit.

Une planification minutieuse avec l'acousticien et le fournisseur de l'appareil permet généralement de ramener les émissions sonores sous la valeur de consigne souhaitée sans surcoût important.

Désormais, le niveau de bruit causé à une température extérieure de 2 °C constitue la valeur de référence déterminante pour définir les émissions de bruit dans le cas de pompes à chaleur air/eau. D'après les prévisions, la déclaration du niveau de puissance acoustique pour A2 s'appliquera à l'autorisation de mise sur le marché et à la documentation technique, et ce, également en vertu des dispositions de la directive européenne sur l'écoconception (voir chapitre 1.3, «Ecodesign et etiquette-energie»).

Chapitre 9

Planification

9.1 Label de qualité GSP/ EHPA

Depuis plusieurs années, les labels de qualité de l'Association européenne des pompes à chaleur (EHPA) et du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) se sont imposés comme un gage de qualité pour les pompes à chaleur destinées au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude. Ils distinguent les appareils particulièrement efficients sur le plan énergétique et qui sont produits par des fabricants répondant aux exigences de qualité en matière de documents de planification et de prestations de service. D'un point de vue énergétique, les labels de qualité se basent sur les valeurs SCOP des appareils (voir Tableau 9.1). Il s'applique aux pompes à chaleur électriques, fabriquées en série jusqu'à une puissance de chauffage de 400 kW.
Depuis 2024, le label de qualité pour les pompes à chaleur pour eau chaude prend également en compte les exigences minimales concernant l'efficacité et il remplace le certificat GSP reconnu jusqu'ici comme la référence en la matière sur le marché suisse. Les exigences relatives aux SCOP définis dans la norme d'essai EN 16147 s'appliquent conformément aux valeurs indiquées dans le Tableau 9.2.

9.2 PAC Système-Module (PAC-SM)

L'intégration des pompes à chaleur dans un système global étant déterminante pour leur fonctionnement optimal, de la production de chaleur au dégagement de chaleur vers la pièce, en passant par le stockage et la distribution, le Groupement professionnel suisse (GSP), ImmoClimat Suisse (ICS), Suissetec et la SICC ont développé et lancé conjointement et avec le soutien de SuisseEnergie le PAC Système-Module (PAC-SM). L'accent est mis sur l'efficacité énergétique et la sécurité de fonctionnement de l'ensemble de l'installation, mais l'objectif est également une attribution claire des responsabilités. Dans le cadre de l'évaluation énergétique de l'appareil, le PAC-SM est jugé en fonction des exigences minimales fixées par le label de qualité GSP/ EHPA. Les principales prescriptions du PAC Système-Module sont les suivantes:

- Dans les nouvelles constructions, le calcul de la puissance de chauffage doit être effectué conformément à la norme SIA 384/1, la puissance de chauffage normalisée selon la norme SIA 384/201. Le supplément pour la production d'eau chaude sanitaire doit dépendre de la norme SIA 384/1.
- Dans les rénovations, la puissance de chauffage doit être déterminée en fonction de la consommation antérieure. Il existe un outil de calcul.
- Lorsque des sondes géothermiques représentent la source de chaleur, elles doivent être dimensionnées selon la norme SIA 384/6.
- Certificat de protection contre le bruit selon Cercle Bruit et les cantons, exigences selon l'Ordonnance sur la protection contre le bruit.

Type de pompe à chaleur	SCOP	
	35 °C	55°C
Air/eau	3,50	3,00
Eau glycolée/eau	4,30	3,38
Eau/eau	4,30	3,38

Tableau 9.1: SCOP de différents types de pompe à chaleur.

Type de pompe à chaleur	SCOP
Air extérieur (A7)	2,80
Air ambiant non chauffé (A15)	2,90
Air vicié (A20)	3,20

Tableau 9.2: Exigences minimales pour les pompes à chaleur pour eau chaude.

- Des raccordements hydrauliques éprouvés sont prescrits pour l'intégration hydraulique.
- Circulateurs: de type à rotor noyé; doivent être conformes à l'Ordonnance sur l'énergie, ce qui implique un indice d'efficacité énergétique IEE de 0,23 au maximum (version 2018).
- Les pompes à chaleur sont certifiées selon le règlement du label de qualité EHPA.
- Fabricant ou fournisseur proposant un service après-vente en Suisse
- Choisir des entreprises de forage présentant le certificat de qualité pour les entreprises de forage.
- Les températures de départ minimales atteignables de la pompe à chaleur sont indiquées dans le Tableau 9.3.
- Mise en service et contrôle ultérieur selon le cahier des charges du PAC Système-Module.

Le PAC Système-Module est applicable aux installations jusqu'à une puissance de chauffage de 15 kW. Les installations peuvent être certifiées avec ou sans production d'eau chaude sanitaire et avec appoint solaire optionnel pour la production d'eau chaude sanitaire. La plupart des cantons et autres organismes de promotion conditionnent les contributions financières au remplacement de chauffages à énergie fossile ou électriques directs par des pompes à chaleur du PAC Système-Module. Pour plus d'informations: www.pac-systeme-module.ch.

9.3 PACesti

PACesti est l'outil de calcul le plus fréquemment utilisé pour la planification des installations de pompe à chaleur. Il sert à calculer le coefficient de performance annuel des pompes à chaleur, les valeurs calculées seront directement utilisables pour les justificatifs Minergie. PACesti est basé sur Excel et est disponible gratuitement sur Internet. Il dispose d'une base de données intégrée dotée des caractéristiques des pompes à chaleur courantes. Les utilisateurs de PACesti ont recours aux justificatifs énergétiques et reprennent les données relatives à la station météorologique, la catégorie de l'ouvrage, la surface de référence énergétique, aux besoins de chaleur pour le chauffage et aux déperditions de chaleur dues à la transmission et à l'aération. Si le produit ne figure pas dans la base de données des pompes à chaleur, le planificateur s'adresse au Centre de test pour les pompes à chaleur de Buchs (Wärmepumpen-Testzentrum Buchs, WPZ) ou au fabricant ou au fournisseur de l'appareil pour obtenir les valeurs. Les températures du système de l'installation de pompe à chaleur, notamment les températures de départ et de retour, sont très importantes pour le calcul du COPA. La température de départ est primordiale pour les locaux exposés. Le planificateur du chauffage fournit les valeurs pertinentes. L'outil de calcul PACesti facilite la comparaison des différentes variantes d'installations, par exemple avec l'air et le sol comme source de chaleur. Pour télécharger PACesti: https://bit.ly/PACesti

9.4 Aides à l'étude du projet

Les normes reflètent l'état actuel de la technique, leur application offre la garantie d'une mise en œuvre appropriée des installations de pompe à chaleur efficientes. Cependant, la plupart du temps, il existe des réglementations complexes qui ne sont guère étudiées au quotidien. Le Groupement professionnel suisse (GSP), ImmoClimat Suisse (ICS), et l'Association suisse et

Tableau 9.3: Exigences minimales concernant les températures de sortie atteignables pour le PAC Système-Module. État novembre 2024.

Type de pompe à chaleur	Air/eau	Eau glycolée/eau	Eau/eau
Températures de départ minimales atteignables	55 °C pour A-7 60 °C pour A0	60 °C pour B0	60 °C pour W10

liechtensteinoise de la technique du bâtiment (Suissetec) ont donc établi des notices techniques sur de nombreux aspects des installations de pompe à chaleur. Celles-ci délivrent des instructions de planification et d'installation sous une forme compacte et facilement compréhensible, aident à réaliser les calculs et proposent des listes de contrôle sur une sélection de thèmes. Ces notices techniques sont disponibles sur les sites Internet de chacune de ces associations et représentent de précieux documents de travail. D'autres outils d'aide sont le programme de calcul PACesti évoqué ci-dessus, le «Calculateur de bruit» du GSP ainsi que les directives et les aides à l'exécution de la Confédération (OFEN/OFEV) et des cantons ainsi que de Cercle Bruit.

9.5 Approvisionnement en électricité

Dans le cas des pompes à chaleur, des moteurs électriques relativement grands sont utilisés pour l'approvisionnement en électricité d'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. En effet, en présence d'un facteur de puissance trop bas (généralement pour un cos-ϕ inférieur à 0,92), bon nombre de fournisseurs d'énergie facturent en supplément la puissance réactive correspondante. Il est également possible de choisir une conduite électrique plus petite et ainsi mois 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.
Dans le cas des grandes installations, il est également recommandé de raccorder les pompes à chaleur et les machines frigorifiques directement à la distribution principale. En cas d'alimentation de secours, les compresseurs ne sont pas obligatoirement alimentés par les groupes électrogènes diesel, en l'absence du raccordement d'appareils sensibles qui doivent toujours être chauffés ou refroidis.

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 (pour petits compresseurs)
- Démarreur progressif (intégré de série dans la plupart des petites pompes à chaleur)
- Convertisseur de fréquence: respecter la classe selon le type d'utilisation (habitations, industrie, artisanat) et les directives CEM (filtre, détendeur, pose des câbles). (CEM: compatibilité électromagnétique)

- 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.

9.6 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 fluides frigorigènes combustibles, la carrosserie de la pompe à chaleur ou la pièce d'installation doit être ventilée vers l'extérieur (respecter les prescriptions de la police du feu).
- 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 (condendat de l'évaporateur).
- 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 fluides frigorigènes 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 évents 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 exigences concernées figurent notamment dans les documents suivants: la norme SN EN 378 et les documents applicables publiés par la Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail (CFST), la Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents (Suva) et l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) (voir chapitre 1.3). 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 (chap. 8).

– 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.

9.7 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, par exemple également accès à la source de chaleur.
– Coûts d'exploitation: Les coûts d'exploitation des systèmes énergétiques comprennen les coûts de l'énergie, de maintenance, de manutention et d'entretien.
– 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.
– 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.
– Renchérissement: Le renchérissement indique l'évolution des prix au cours du temps, p. ex. coûts de l'énergie
– Coûts externes: Pour les coûts externes (y c. les coûts environnementaux ou l'augmentation prévue du coût de l'énergie KEPZ), les valeurs doivent être choisies en fonction des dernières découvertes scientifiques dis-

Critères de comparaison des offres de pompes à chaleur

Coûts
– Coûts d'investissement
– Coûts de maintenance
– Coûts d'exploitation

Volume de livraison
– Intégralité
– Interfaces (choix et adéquation)
– Coûts relatifs à la construction
– Durée et conditions de la garantie, évent. avec réception en usine
– Intégration
– Fonctionnalité

Prestations
– Fonctionnalité
– Coefficient de performance annuel (COPA) 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, resp. SCOP. La même chose s'applique au cas de refroidissement avec l'indice Energy Efficiency Ratio (EER).
– Puissance de chauffe et de refroidissement
– Limites d'utilisation

Dans les installations de plus grande taille, en plus:
– Perte de charge des échangeurs de chaleur
– Caractéristique TEWI (chap. 3.6)

Qualité
– Label de qualité ou pompe à chaleur Système-Module
– Service du fournisseur (365 jours, 24 heures sur 24)
– Disponibilité des pièces de rechange
– Assurance-qualité du système
– Références

ponibles ou de valeurs approuvées par les autorités fédérales.
– Comparaison des différentes offres de pompes à chaleur: Lors de la comparaison des différentes offres, il convient de prendre en considération les critères spécifiés dans l'encadré.

Prix de l'énergie
– Les installations énergétiques et leurs composants ont une longue durée de vie (10 à 40 ans). L'évolution des intérêts et de l'inflation, en particulier pour les prix de l'énergie, n'est pas prévisible sur une période aussi longue. Il est donc toujours intéressant de procéder à une analyse de la sensibilité (comparaison des résultats de différentes hypothèses).
– Pour les agents énergétiques raccordés par câble, outre les données basées sur la quantité, il convient éventuellement de tenir compte également des contributions du réseau, des prix de base et des prix de la puissance.

Facteur	Influence sur l'efficacité	Mesure d'optimisation
Température de la source de chaleur	Des températures élevées améliorent l'efficacité.	Choix d'une source de chaleur avec la température la plus haute possible, p. ex. les eaux souterraines à la place de l'air extérieur
Température de départ du système de chauffage	Des températures de départ plus basses augmentent l'efficacité.	Utilisation de chauffages de surface (chauffage au sol, etc.) ou de radiateurs à basse température
Mode de fonctionnement de la pompe à chaleur	Les systèmes modulants sont plus efficaces que les systèmes à régulation on-off.	Utilisation de pompes à chaleur à vitesse variable et à commande intelligente
Système hydraulique et régulation	Une bonne coordination réduit les pertes et augmente l'efficacité.	Optimisation du dimensionnement de la pompe, prévention d'erreurs de circulation et de fortes pertes de pression, commande adaptée aux besoins et équilibrage hydraulique de la distribution de chaleur
Site et climat	Des températures froides réduisent l'efficacité, notamment dans le cas des pompes air/eau.	Sélection d'une pompe à chaleur appropriée qui présente une efficacité élevée pour des régions froides et qui propose éventuellement des solutions hybrides (en cas de charge importante)
Auxiliaires	Des groupes auxiliaires efficaces augmentent l'efficacité globale.	Pompes de circulation efficaces et, le cas échéant, des ventilateurs; faible consommation de la régulation en mode veille; si possible: coupure totale du chauffage en été
Production d'eau chaude	Des températures d'eau chaude élevées réduisent l'efficacité de la pompe à chaleur.	Utilisation d'un accumulateur d'eau chaude séparé («chauffe-eau d'appoint»), d'une pompe à chaleur pour eau chaude («chauffe-eau pompe à chaleur») ou d'une combinaison avec installation solaire thermique; choix d'un chauffe-eau approprié à des pompes à chaleur avec une surface d'échangeur de chaleur minimale de 0,3 m^2 par kilowatt de puissance de chauffage en mode production d'eau chaude

Tableau 9.4: Facteurs influant sur l'efficacité d'une installation de pompe à chaleur.

9.8 Contrôle des résultats

Les pompes à chaleur sont particulièrement sensibles aux changements de conditions lors du fonctionnement. Le contrôle des résultats est un instrument important qui permet de mettre en œuvre une production de chaleur et de froid qui se distingue par son absence de dysfonctionnement, sa longévité et son efficacité énergétique. En outre, il constitue notamment la base de toute optimisation. Si ce dispositif est appliqué d'une manière cohérente, il est alors possible de réaliser des économies d'énergie comprises entre 10 % et 15 % dans le cas d'installations qui fonctionnent généralement bien. Le tableau Tableau 9.4 fournit un aperçu des facteurs influant sur l'efficacité et une vue d'ensemble des mesures d'optimisation éventuelles. Bien entendu, il est également recommandé de prendre en compte ces facteurs dès le dimensionnement et la planification des pompes à chaleur.

Un contrôle des résultats constitue une option judicieuse et rentable, quelle que soit la taille des installations (grandes ou petites). Certes, les petites installations ne font généralement l'objet que d'opérations de mesure peu importantes ou peu complexes, pour des raisons de coût. Toutefois, ces dernières permettent d'obtenir des indications importantes concernant leur bon fonctionnement.

À l'heure actuelle, la saisie et l'affichage des paramètres de fonctionnement sont de plus en plus proposés par les régulateurs, et ce, même dans le cas d'appareils de série. En outre, ces fonctions sont souvent offertes par des régulateurs de niveau supérieur, notamment lorsqu'une installation photovoltaïque et un accumulateur à batterie sont intégrés dans l'ensemble du système. Dans ce contexte, il est nécessaire de contrôler la façon dont les valeurs émises sont obtenues et s'il s'agit de «véritables» valeurs de mesure ou bien de valeurs de tableau issues de diagrammes caractéristiques. Ces derniers peuvent afficher des valeurs

Pos.	Type	Région	Altitude au-dessus du niveau de la mer (m)	Chauffage par radiateurs		Chauffage au sol	
				Température de conception 45/40 °C		Température de conception 35/30 °C	
				Chauffage uniquement	Avec ECS	Chauffage uniquement	Avec ECS
1	Air-eau	Plateau	400 à 500	2,90	2,80	3,50	3,25
2		Préalpes	≤ 800	2,65	2,60	3,25	3,00
3			≤ 1000	2,55	2,50	3,15	2,90
4	Air-eau split	Plateau	400 à 500	2,80	2,70	3,40	3,15
5		Préalpes	≤ 800	2,55	2,50	3,15	2,90
6			≤ 1000	2,45	2,40	3,05	2,80
7	Air-eau Inverter	Plateau	400 à 500	3,00	2,80	3,55	3,30
8		Préalpes	≤ 800	2,75	2,65	3,25	3,10
9			≤ 1000	2,65	2,55	3,15	3,00
10	Sol-eau	Plateau	400 à 500	3,50	3,40	4,40	4,10
11		Préalpes	≤ 800	3,40	3,30	4,30	4,00
12		Région de montagne	> 800	3,30	3,20	4,20	3,90
13	Sol-eau Inverter	Plateau	400 à 500	3,70	3,60	4,50	4,35
14		Préalpes	≤ 800	3,60	3,50	4,40	4,25
15		Région de montagne	> 800	3,50	3,40	4,30	4,15

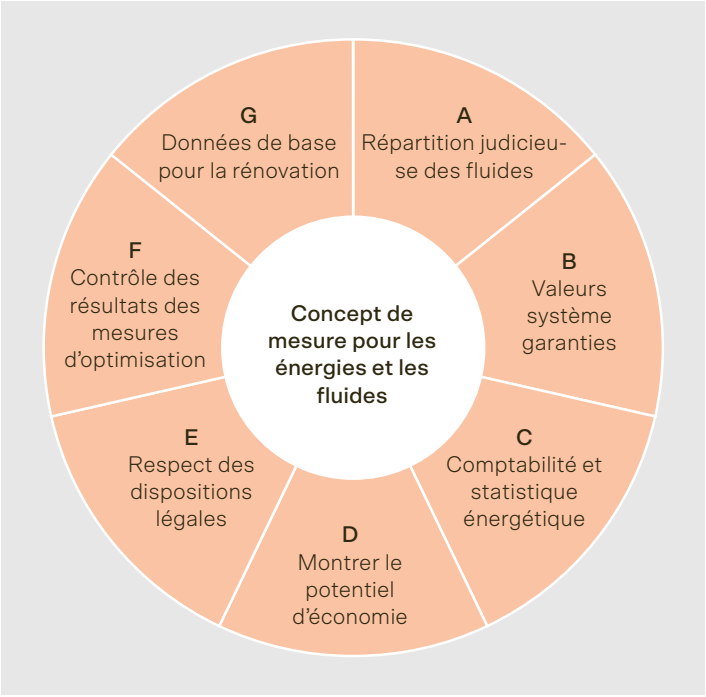
Tableau 9.5: Valeurs indicatives pour les coefficients de performance annuels de différents types de pompe et de diverses applications. (Source: Hubacher Engineering GmbH)

encore «correctes» même en cas de défaut.
Afin de permettre un contrôle pertinent des résultats, il est nécessaire de définir un concept de mesure dès la planification de l'installation de pompe à chaleur. Pour ce faire, le choix des limites du système constitue un critère important (chapitre 1.2). Seule une connaissance préalable du processus et de l'instrumentation nécessaires permettra de réaliser un contrôle correct des résultats ultérieurement. Une planification prospective tient également compte de la possibilité d'ajouter d'autres instruments, par exemple en installant des raccords et des robinets d'arrêt.

Valeurs de référence

Afin d'évaluer les résultats du contrôle, il est possible de faire appel à des valeurs comparatives ou empiriques provenant d'installations similaires. Le Tableau 9.5 énumère certaines valeurs indicatives pour les coefficients de performance annuels (COPA) de différents types de pompe à chaleur et de diverses applications.
S'agissant de ces informations, il convient impérativement de considérer qu'elles dépendent fortement des conditions réelles sur site (température ambiante, qualité énergétique de l'enveloppe du bâtiment, générateurs de chaleur supplémentaires, etc.) et qu'elles ne sont donc données qu'à titre indicatif.
Si les valeurs du contrôle des résultats sortent du cadre indiqué par les fabricants ou les planificateurs, il est alors recommandé de faire appel à un installateur compétent qui réglera la pompe à chaleur de sorte qu'elle fonctionne d'une manière plus efficace. En outre, des indications importantes concernant d'éventuelles optimisations sont également fournies par des pannes (non détectées). Parmi celles-ci figure notamment l'utilisation involontaire d'un chauffage électrique. En effet, celle-ci peut générer à elle seule un coefficient de performance annuel (COPA) élevé pour la pompe à chaleur.
D'une manière générale, il convient également d'éviter de brèves périodes de fonctionnement du compresseur à chaque démarrage. À ce titre, une période de 20 à 30 minutes peut être considérée comme une durée minimale de fonctionnement. En effet, des périodes de fonctionnement nettement plus longues sont normalement possibles, et ce, notamment dans le cas d'appareils à puissance variable. À l'inverse, des périodes de fonctionnement courtes lors de chaque mise en marche peuvent indiquer que le système hydraulique et/ou la stratégie de régulation n'opèrent pas de manière optimale.

Illustration 9.1: Concept de mesure pour les énergies et les fluides selon SICC 98-1.



Concept de mesure

La gestion de l'énergie et les optimisations d'exploitation reposent sur la mise en œuvre d'un concept de mesure efficace et clairement défini. D'après la directive SICC 98-1 «Concept de mesure pour les énergies et les fluides», ce dernier comporte les éléments présentés dans l'Illustration 9.1. Ce concept est considéré comme la condition préalable à la réalisation des objectifs suivants:

A. *Le concept de mesure donne lieu à une structure judicieuse de la répartition des fluides. Des mesures peuvent être intégrées en permanence ou pour une courte période (mesure temporaire). Des mesures doivent également être ajoutées ultérieurement à un prix avantageux. Des mesures doivent être prises en conséquence. Exemple: installation d'un raccord pour compteur d'énergie.*
B. *Le concept de mesure montre l'installation de dispositifs de mesure nécessaires pour la vérification de valeurs de système garanties. Exemples: COPA pour les pompes à chaleur, ES-EER pour les machines frigorifiques*
C. *Le concept de mesure prévoit l'intégration de dispositifs de mesure pour la réalisation de la comptabilité et de statistiques relatives à l'énergie.*
D. *Le concept de mesure permet l'insertion de dispositifs de mesure pour identifier le potentiel d'économie d'énergie. Les mesures d'optimisation de l'exploitation en découlent ensuite.*
E. *Le concept de mesure permet l'intégration de dispositifs de mesure pour le décompte des frais supplémentaires en fonction de la consommation. D'un côté, cela permet de respecter les dispositions légales, d'un autre côté les souhaits des maîtres d'ouvrage ou des locataires sont ainsi satisfaits.*
F. *Le concept de mesure permet l'installation de dispositifs de mesure pour le contrôle des résultats par le biais des mesures d'optimisation de l'exploitation mises en œuvre.*
G. *Le concept de mesure permet le montage de dispositifs de mesure dont les résultats de mesure servent de base pour la planification et la réalisation du renouvellement ou du remplacement des installations.*

Source: directive SICC 98-1 «Concept de mesure pour les énergies et les fluides»

Fonctions

Un concept de mesure clairement défini et combiné avec une évaluation des mesures pour l'énergie et les fluides constitue la condition préalable à un fonctionnement qui permet d'assurer les fonctions suivantes:

- Identifier des indices énergétiques pertinents pour la vérification des données de planification et le contrôle des valeurs de garantie
- Fournir des données pour l'optimisation énergétique de l'exploitation (OéE); des potentiels d'économie d'énergie sont ainsi localisés et les bases pour les mesures d'OéE sont définies
- Permettre la détection (précoce) des dysfonctionnements
- Fournir des bases pour réaliser des prévisions de consommation et établir un budget
- Assurer le respect des prescriptions légales, telles que le décompte des frais de chauffage en fonction de la consommation

Dispositifs de mesure

Il est recommandé que le concept de mesure comprenne les dispositifs et points de mesure suivants:

- un compteur d'électricité pour le compresseur
- un compteur d'heures d'exploitation et d'impulsions pour le compresseur
- un compteur de chaleur pour chaque générateur de chaleur
- une prise de pression pour la saisie des températures d'entrée et de sortie dans le circuit de l'évaporateur et du condenseur et éventuellement pour la mesure de pertes de pression; si possible, il est recommandé de prévoir des mamelons de mesure Twinlock et éventuellement une vanne à boisseau sphérique avec support pour sonde

Les installations complexes de grande taille requièrent également la mise en œuvre des dispositifs suivants:

- des capteurs de température d'entrée et de sortie sur chaque échangeur de chaleur
- des capteurs de température d'air ambiant
- des capteurs de température extérieure
- un système d'interrogation du réglage de la puissance des compresseurs
- un compteur d'heures de service (éventuellement un compteur électrique) pour les pompes, les ventilateurs, les chauffages d'appoint (p. ex. chauffage de secours électrique), etc.
- un compteur de chaleur pour chaque source de chaleur
- un système d'interrogation des positions des vannes et des soupapes

Les dispositifs de mesure sont sujets à des incertitudes de mesure qui dépendent essentiellement de la qualité des appareils et de leur coût. Il convient de prendre tout particulièrement en compte les points suivants dans le cas des compteurs de chaleur:

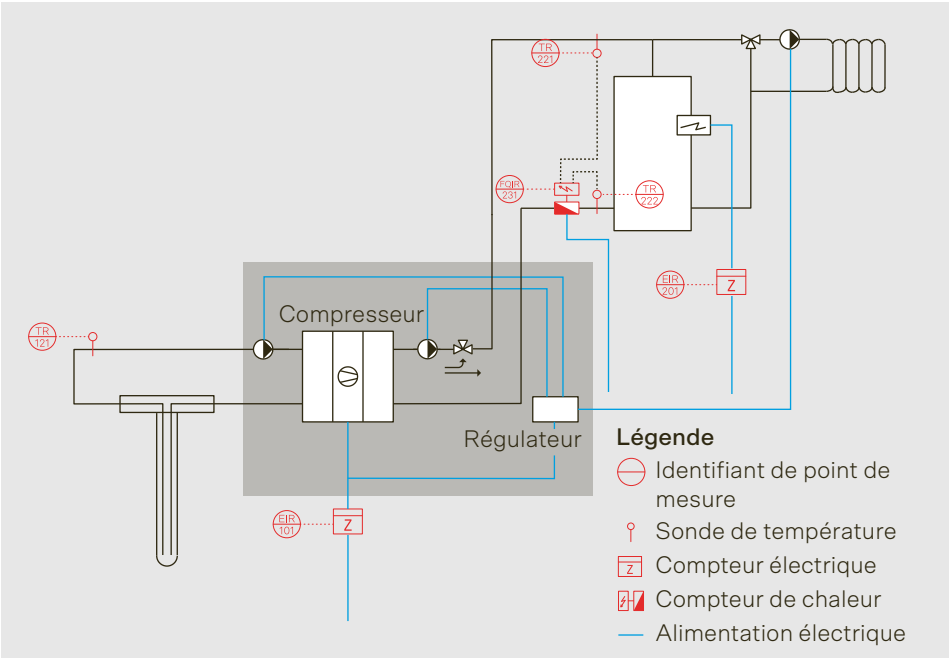
- L'incertitude de mesure du débit volumique dépend du débit réel.
- Elle dépend également de la différence de température dans le circuit de départ et dans celui de retour.
- Il est nécessaire de s'assurer que les fluides corrects (eau, eau glycolée, etc.) soient indiqués dans le calculateur. Toute indication incorrecte entraîne des erreurs systématiques.
- Il est indispensable de veiller à ce que les dispositifs de mesure soient montés et intégrés conformément aux consignes du fabricant. La position de montage, les tronçons de stabilisation et l'intégration de points de mesure du débit volumique dans le retour sont les éléments les plus importants à prendre en compte.

La précision de mesure du coefficient de performance annuel (COPA) peut généralement varier entre 5 % et 10 % du fait des incertitudes de mesure pour l'énergie électrique et la chaleur produite. Afin d'obtenir des résultats plus précis et de réduire le pourcentage d'erreur, il est recommandé de se poser les questions suivantes et de tenter d'y répondre:

- Les tronçons d'entrée et de stabilisation nécessaires sont-ils respectés en amont et en aval du point de mesure du débit volumique pour les compteurs de chaleur? Les appareils à ultrasons ne posent généralement aucun problème à cet égard.
- Quels sont les récepteurs exploités et via quels raccordements électriques le sont-ils? Les récepteurs à faible consommation, tels que les pompes de circulation et l'électronique des régulateurs, peuvent être approvisionnés via une phase de l'alimentation du compresseur ou via un câble monophasé séparé.
- Les récepteurs externes qui ne sont pas directement alimentés par l'unité pompe à chaleur (p. ex. les corps de chauffe électriques directs dans les accumulateurs) sont-ils également pris en compte par la mesure?
- Quel est le point où la chaleur sera mesurée? Est-il possible de distinguer chaleur thermique et eau chaude si cela est souhaité?
- Dans l'idéal, il est recommandé de plonger directement les sondes de température courtes (jusqu'à 60 mm). Si des doigts de gant sont utilisés, ils doivent convenir exactement aux sondes employées, et ce, sans recourir à une pâte thermique. Il est recommandé d'acheter les doigts de gant auprès du fournisseur des compteurs de chaleur.
- Il est interdit de rallonger ou de raccourcir les raccordements des sondes de température montées en usine.
- Les sondes de température sont-elles correctement placées dans le tuyau? La position de la pointe des sondes est-elle correcte?
- Les sondes de température séparées qui n'appartiennent pas à un compteur de chaleur donné sont-elles correctement étalonnées (p. ex. pour la surveil-

lance de la température des sondes géothermiques)?
– Le même système est-il utilisé aussi bien pour le chauffage que pour le refroidissement? Dans ce cas, les compteurs de chaleur doivent être tout particulièrement dimensionnés pour saisir aussi bien la chaleur que le froid et la consommation d'électricité de la pompe à chaleur doit être correctement répartie.

L'Illustration 9.2 représente un exemple simple de points de mesure du COPA pour une petite installation de pompe à chaleur en mode chauffage (limites du système, taux d'utilisation de la chaleur TUC) qui peut être appliqué sans trop de complexité, dans la mesure du possible. Le raccordement électrique de la pompe à chaleur alimente aussi bien le régulateur que l'ensemble des pompes de circulation. Il est également judicieux et avantageux de saisir la période de fonctionnement ou la consommation électrique (EIR 201) des éléments de post-chauffage. Cette saisie fournit des indications concernant d'éventuels dysfonctionnements, tels que l'utilisation involontaire d'un chauffage de secours électrique, pendant le service.
Si la période de service est saisie, il convient alors de veiller à ce que le temps de fonctionnement effectif du post-chauffage soit réellement mesuré, en plus du nombre d'activations par le régulateur. Afin de déterminer les démarrages du compresseur, il est possible d'utiliser des compteurs doubles qui saisissent et affichent aussi bien le temps de fonctionnement que les mises en marche.



Identifiant de point de mesure	Grandeur de mesure	Unité
EIR 101	Énergie électrique du compresseur	kWh
TR 121	Température de sortie de la sonde géothermique	°C
TR 221	Température de départ de l'accumulateur tampon d'eau pour eau de chauffage	°C
EIR 201	Énergie électrique du chauffage de secours	kWh
TR 222	Température de retour de l'accumulateur tampon d'eau pour eau de chauffage	°C
FQIR 231	Chaleur de charge de l'accumulateur tampon d'eau pour eau de chauffage	kWh

Illustration 9.2: Exemple de schéma pour le dispositif de mesure servant à déterminer le COPA. Identifiants des points de mesure selon les normes DIN 19227 et DIN EN 62424.

Chapitre 10

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 (voir aussi SN EN 378). 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.

Description succincte selon la norme SIA 113

La recommandation SIA 113 FM adapté à la planification et à la réalisation de construction (Illustration 10.1) décrit les tâches d'un Facility Management (FM) adapté à la planification et accompagnant la construction. Les cinq phases du processus de construction selon le Modèle de prestations SIA 112 séparent verticalement le graphique subdivisé en phases partielles définies. Les principaux thèmes de classification horizontaux sont les points de vue à prendre en compte, de l'assurance-qualité du point de vue du FM à la gestion des données et de l'information. Les points de vue des propriétaires, des usagers et des prestataires de service sont classés selon les thèmes Finances et ressources, Processus et tâches et Organisation. La gestion des données et de l'information comprend, en outre, les thèmes Désignation et structuration, Classement et Échange. Des prestations sont définies par phase partielle pour chaque thème au niveau des interfaces. La classification selon les points de vue des propriétaires, des usagers et des prestataires de service vise à intégrer systématiquement et complètement les principales exigences de la phase d'exploitation dans la phase de planification et de réalisation.

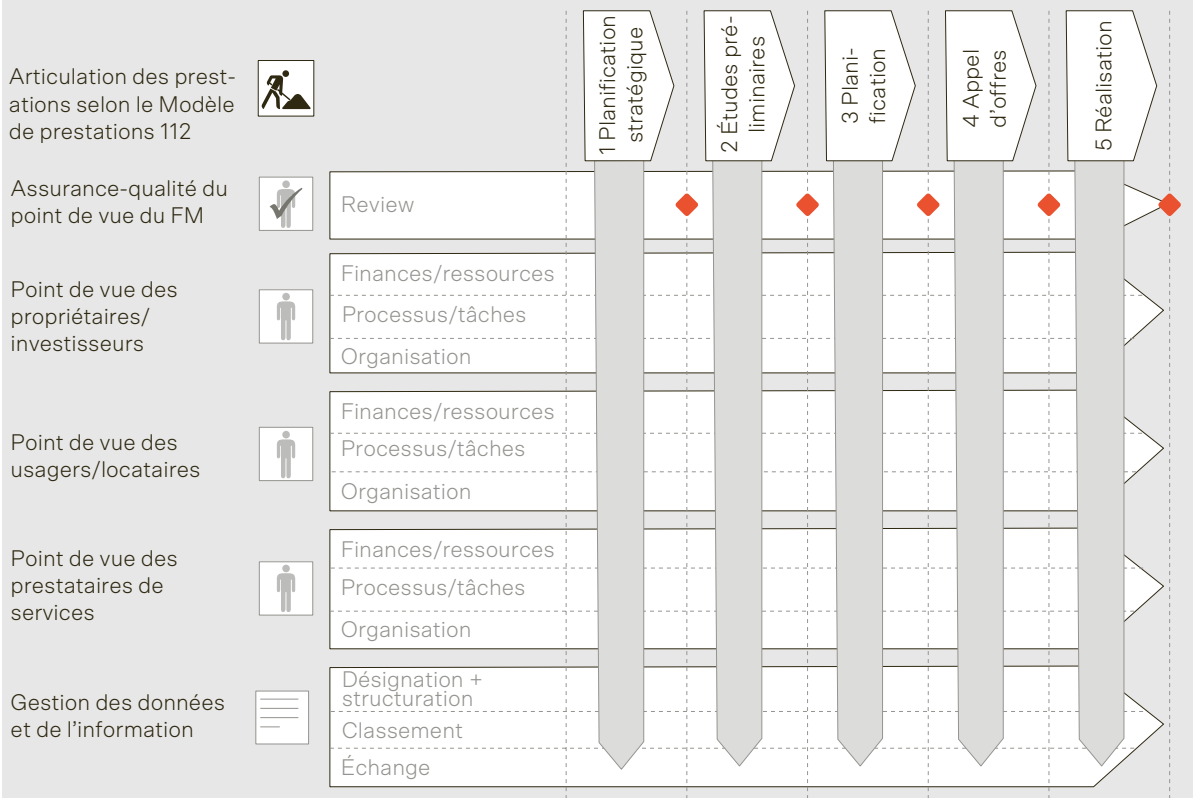


Illustration 10.1: Différents points de vue dans FM selon la norme SIA 113. (Source: Facility Management pbFM adapté à la planification et à la réalisation de constructions, guide pratique pour la recommandation SIA 113, CRB)

10.1 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 plongeuses et d'instruments de mesure est généralement coûteuse c'est pourquoi elle devrait être prévue dès la planification (chap. 9.8). 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 (p. ex. dans des tronçons de stabilisation avant ou après les compteurs volumétriques) et correctement montés (p. ex. position de montage) (Respecter les données du fabricant).

10.2 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 (y c. rapport de sécurité selon l'Ordonnance sur les installations à basse tension OIBT). 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
- Éventuellement plan des points de mesure
- 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.
- Éventuellement procès-verbal d'essai et de réception

Il est avantageux que tous ces documents soient compilés dans un classeur relatif à l'installation et qu'ils soient

accessibles à toutes les personnes concernées, mais disponibles sur l'installation même (chap. 10.8).

10.3 Source de chaleur et dégagement 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 dégagement de chaleur et de procéder aux préparatifs correspondants.
Vérifier que l'installation est complète:

- Pour les sondes géothermiques et les captages d'eau souterraine: documents relatifs à la qualité de l'installation (contrôle de réception norme SIA 384/6 resp. norme SIA 384/7).
- Vérifier que les systèmes d'eau sont rincés, remplis (observer la Directive SICC BT102-01) 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)
- 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 le côté source de chaleur du système sur les pompes à chaleur air-eau.
- Ouvrir éventuellement des installations d'arrêt.
- Les douilles plongeuses doivent toujours correspondre exactement (c.-à-d. sans jeu) aux sondes de température utilisées (même qualité de matériau). N'utiliser un matériau de contact thermique («pâte thermique») que dans des cas exceptionnels.

10.4 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 ventilation. 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 P, temps de dosage d'intégration, constante de temps), courbes de chauffe, valeurs de consigne etc. suivant les valeurs calculées ou recommandées (par le concepteur).

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

10.6 Instructions de service

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

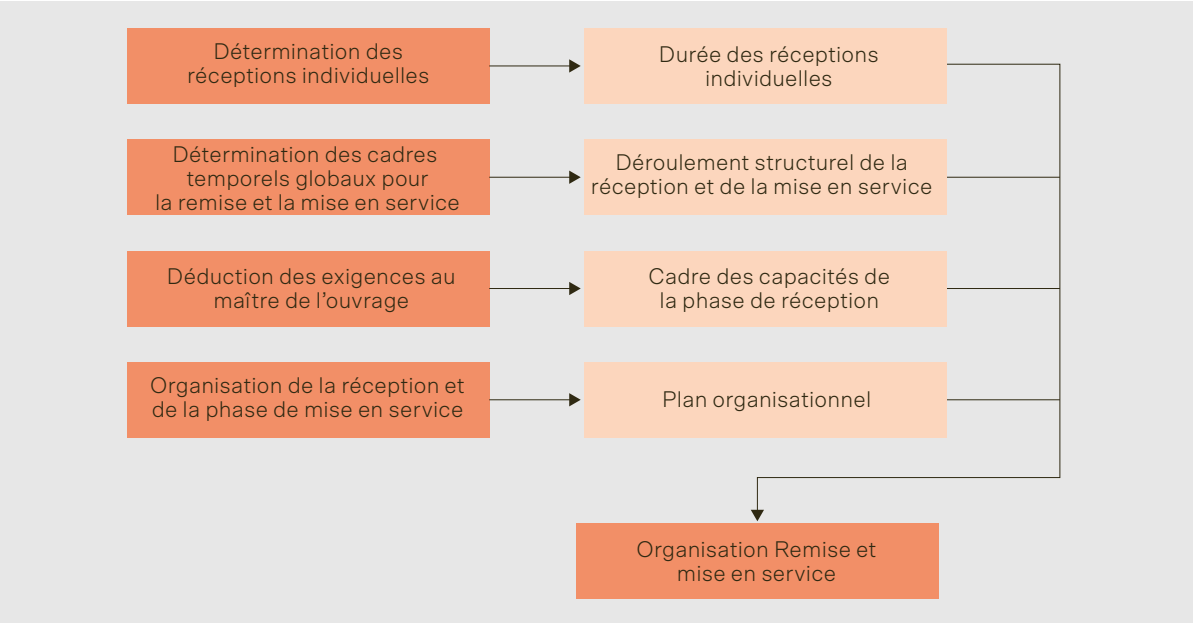


Illustration 10.2: Organisation de la réception, de la remise et de la mise en service. (Source: Real Estate und Facility Management, Preuss, N. et Schöne L.B., 2010)

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.

10.7 Protocole 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 protocole 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. Il arrive souvent que la période allant de l'achèvement de la construction au début de l'utilisation soit sous-estimée. Cela concerne en particulier les biens occupés par leur propriétaire, dans lesquels les usagers apportent encore des installations ou des équipements après l'achèvement par les entreprises exécutantes (aménagement final). Les principales activités sont réunies dans l'Illustration 10.2.

Phases individuelles

L'ensemble de la période allant de l'achèvement de la construction à l'utilisation s'articule en plusieurs phases individuelles. La période destinée à la réception est ainsi déterminée par la durée de la réception individuelle la plus longue. Les réceptions des installations techniques sont généralement réalisées en parallèle. Suivant la taille du projet, plusieurs personnes dotées de compétences en matière d'installations techniques doivent être disponibles.
Exemples: Électrique: chauffage, ventilation, climatisation, refroidissement (CVCR); sanitaire: mesure, commande, régulation, automatisation; technologie de l'information et de la communication

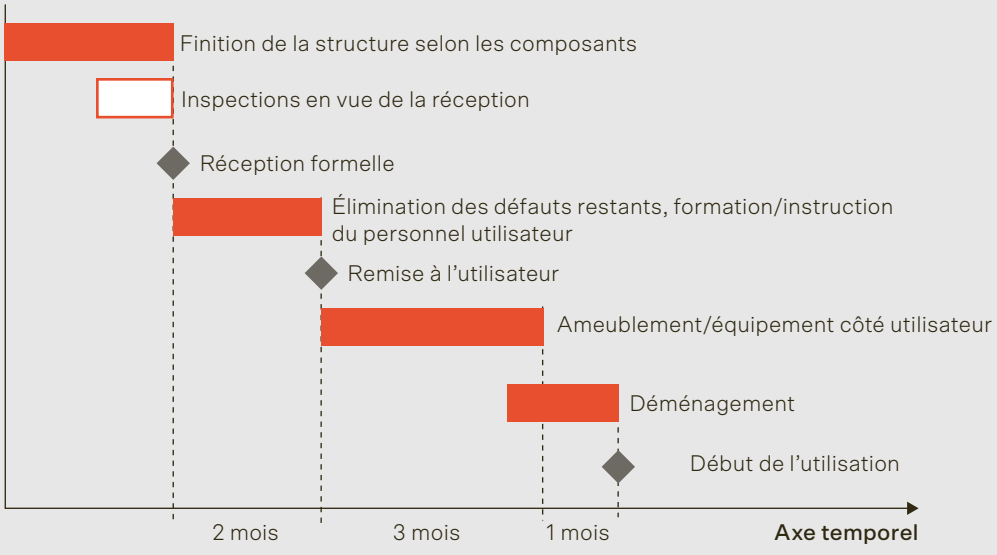


Illustration 10.3: Séquence structurelle de réception et de mise en service. (Source: Real Estate und Facility Management, Preuss, N. et Schöne L.B., 2010)

(ICT) et systèmes d'alarme tels que: système d'alarme incendie (BMA), systèmes d'évacuation des fumées et de la chaleur (RWA), technologies d'extinction gaz, eau, eaux usées et incendie (GWA) etc. En fonction du métier, les procédures individuelles doivent tenir compte du fait que la mise en service (tests fonctionnels et essais de fonctionnement) est effectuée lors de la préparation des essais de réception. Sont éventuellement concernées les autorités de réception telles que l'ESTI (Inspection fédérale des installations à courant fort), ASIT (Association suisse d'inspection technique) etc. L'Illustration 10.3 présente un exemple de calendrier.
Les étapes clés telles que la réception, la remise et le début de l'utilisation doivent être soigneusement planifiées avec tous les acteurs du projet et respectées. Il est important de déterminer la date de prise d'effet légale des prestations de garantie en cas de prestations de construction fournies. Normalement, elle intervient après la réception formelle et doit être consignée par écrit dans le procès-verbal de réception.
Remarque: Il est possible de prolonger les délais de garantie par contrat. Il est également important de négocier le plus tôt possible les contrats de service avec les prestataires de service.
Des documents de révision corrects comprenant toutes les données de l'installation marquent le début d'un processus de Facility Management efficace et efficient. La directive SICC 95-2 relative à la maintenance sert de base à la rédaction d'une notice d'utilisation. Les entreprises spécialisées doivent intervenir auprès des clients sur la base de ces directives pour procéder à la maintenance régulière. Les points à respecter à ce propos sont les suivants:
- Le concept de maintenance devrait être défini dès l'étape de planification sous la forme d'un devis estimatif.
- Le concept devrait être mis en œuvre au plus tard après le montage des installations techniques.
- Intégrer les éventuelles installations techniques existantes à ce nouveau concept de maintenance.

Les opérations de maintenance ne peuvent être confiées par les propriétaires ou les usagers qu'à un personnel formé ou à des entreprises spécialisées.

Processus de gestion des garanties	
Objectif du processus	Les défauts tombant sous la prestation de garantie sont éliminés par le fabricant ou le fournisseur.
Grandeurs de mesure processus en amont	Nombre de réclamations de garantie manqués Réception
Processus suivants	aucun
Prestations	– Observer les délais de prescription – Contrôler et faire valoir les droits pour les défauts – Suivre les mesures correctives – Effectuer les mesures de garantie
Brève description	Dans le processus de «Gestion des garanties», saisir et surveiller les délais de garantie. Lorsqu'un défaut apparaît au cours du délai de garantie, il est réparé immédiatement dès sa survenance et un délai est fixé à cet égard. La réparation du défaut est surveillée et contrôlée. S'il n'est pas remédié au défaut malgré une mise en demeure, l'exploitant peut faire réparer le défaut lui-même et imputer les frais encourus au concepteur ou les faire valoir sur la garantie bancaire. Avant la fin de la période de garantie pour les corps de métier principaux, il est conseillé d'effectuer un contrôle de garantie.

Tableau 10.1: Définition du processus «Gestion de la garantie» selon le Modèle de prestations des processus du Facility Management (ProLeMo) de CRB.

10.8 Documentation relative à l'installation

Pour que les informations et données importantes de l'installation figurent sur celle-ci, il convient généralement d'élaborer pour chaque installation un classeur de l'installation regroupant les informations suivantes.

- Adresses des entreprises et du service après-vente, ainsi que pour la notification des dysfonctionnements.
- Bases de calcul de l'installation de pompe à chaleur, données de base et calcul de la puissance des générateurs de chaleur
- Caractéristiques techniques de la pompe à chaleur, des circulateurs etc.
- Dans le cas d'installations à sondes géothermiques: procès-verbal de dimensionnement des sondes géothermiques selon la norme SIA 384/6, profil de forage de l'entreprise de forage et plan de situation des sondes
- Dans le cas d'installations avec pompe à chaleur air-eau: disposition (présentation) et certificat de protection contre le bruit
- Procès-verbal de mise en service du fournisseur de la pompe à chaleur
- Procès-verbal de mise en service de l'installateur, y compris procès-verbal de réglage des débits massiques et calculs des pertes de pression
- Notices d'utilisation de tous les composants importants
- Schéma électrique et de principe
- Permis de construire, autorisations d'installer par le distributeur d'énergie électrique et/ou de forer la/les sonde(s) géothermique(s) par le service cantonal concerné
- Divers

Chapitre 11

Exploitation

11.1 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.

11.2 Surveillance de l'exploitation

Le personnel d'exploitation doit procéder régulièrement à des contrôles d'exploitation. À 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 (COPA) et le rendement annuel pour pompe à chaleur et chauffage d'appoint (WNG/SNG). L'examen de ces critères n'est possible 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. Le nombre d'activations du compresseur peut également fournir des informations intéressantes sur le fonctionnement des pompes à chaleur. Dans le cas des pompes à chaleur fabriquées généralement en série, il peut être détecté et consulté via le régulateur. Dans le cas des petites et grandes installations, il convient également de surveiller les temps de fonctionnement des éventuels composants électriques. Dans le cas des pompes à chaleur saumure-eau, il est recommandé de contrôler régulièrement la température minimale dans le circuit de saumure.

11.3 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 ou peut entrer en contact avec le fluide frigorigène, doit être muni d'un «Permis pour l'utilisation de fluides frigorigènes».

Livret d'entretien
La déclaration et la tenue d'un livret d'entretien est obligatoire pour tous les appareils et installations contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène, quel qu'en soit le type. La vignette (étiquette) permettant d'identifier l'installation doit être apposée sur l'appareil.

Contrôle d'étanchéité
Un contrôle d'étanchéité régulier doit être effectué sur tous les appareils et installations contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène stable dans l'air ou

appauvrissant la couche d'ozone (voir également la directive «Installations et appareils stationnaires contenant des fluides frigorigènes, livret d'entretien, contrôle d'étanchéité, déclaration obligatoire»).
Des délais plus longs s'appliquent aux installations compactes scellées en permanence (définition conformément à SN EN 378, p. ex. liaisons soudées ou brasées dans le circuit de froid).

11.4 Optimisation de l'exploitation

Une installation qui est exploitée de manière optimale ne connaît en principe pas de dysfonctionnements, consomme moins d'énergie, ce qui réduit les coûts d'exploitation et permet même une atmosphère plus agréable. Lors de la mise en service, 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 des réglages de l'installation ne peut avoir lieu qu'au cours du fonctionnement, c'est-à-dire en se basant sur les besoins réels. L'optimisation de l'exploitation demeure donc une tâche permanente (processus), car les conditions d'utilisation évoluent souvent au fil du temps.
Les objectifs des optimisations de l'exploitation sont en principe: un réglage optimal d'une installation technique, une offre d'énergie adaptée au niveau de température requis, la fourniture de l'énergie au moment requis, atteindre les rendements les plus hauts possibles lors de la production et de la distribution de chaleur. Pour les atteindre, il convient de respecter en permanence les exigences techniques de sécurité et les exigences relatives à l'hygiène.
Remarque: L'optimisation de l'exploitation est une prestation supplémentaire qui doit être commandée par le maître

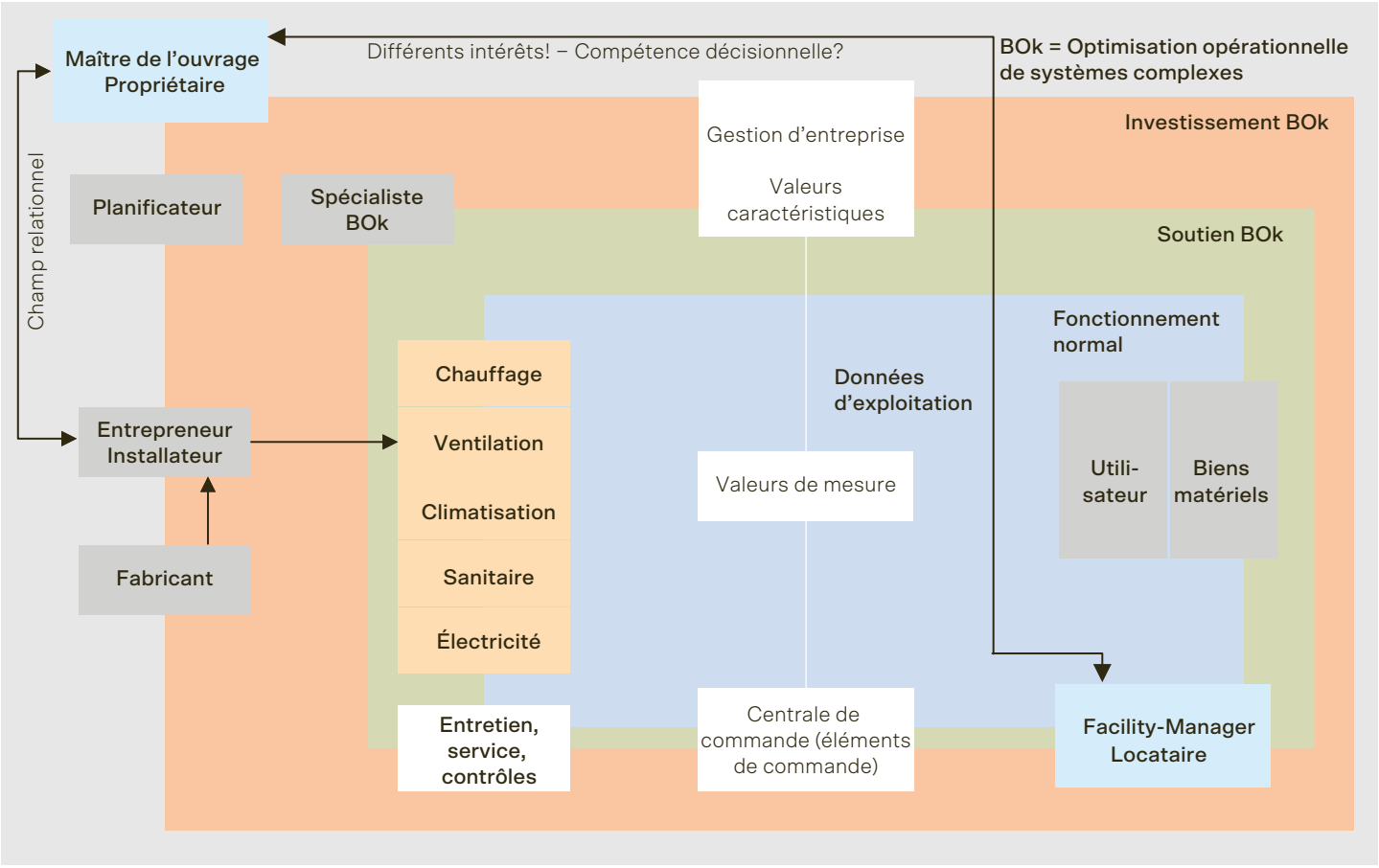


Illustration 11.1: Le modèle BOk à 3 niveaux indique les cercles d'intérêt interconnectés ainsi que les cycles pertinents pour le processus BO. (Source: Grundlagen für die Betriebsoptimierung von komplexen Anlagen (BOk), BFE 2002)

d'ouvrage, conformément au Modèle de prestations SIA 112.

Concept d'optimisation de l'exploitation

On distingue trois niveaux d'intervention dans l'optimisation de l'exploitation (OE) (source: SuisseEnergie):

- Exploitation normale: optimisation de l'exploitation par des contrôles, des enregistrements et meilleur réglage des installations (réglage). Aucun investissement n'est nécessaire, excepté pour l'entretien courant. Aucun savoir-faire spécifique en matière d'optimisation de l'exploitation ni recours à des spécialistes externes n'est requis.
- Soutien OE: optimisation ciblée de l'exploitation sur la base d'évaluations et de mesures spécifiques; mesures immédiates avec un investissement minimum (env. 3000 CHF); faire appel à un professionnel de l'optimisation de l'exploitation.
- Investissements OE: optimisation de l'exploitation par le biais d'investissements sélectifs. L'analyse minutieuse des installations en choisissant les mesures offrant le potentiel d'économie le plus important et le meilleur rapport coûts/efficacité est la base pour la suite de la procédure (y c. l'établissement du budget). La programmation d'une rénovation ou du remplacement de diffé-rents composants est la condition idéale pour réaliser des investissements OE. Il est alors important d'impliquer les différentes parties prenantes à chaque niveau d'intervention.

La norme SIA 2048:2015 fait la distinction entre l'optimisation énergétique de l'exploitation après remise et comme tâche permanente. La principale différence réside dans l'absence de données d'exploitation mesurées au début de l'optimisation de l'exploitation.

- L'optimisation énergétique de l'exploitation immédiatement après la remise met l'accent sur les domaines suivants: vérifier la stabilité des différents circuits de réglage en mode dynamique; vérifier les séquences de réglage (p. ex. chauffage, RC, refroidissement) en mode dynamique; analyser et vérifier les comportements à l'activation/désactivation et au réglage des installations commandées en fonction

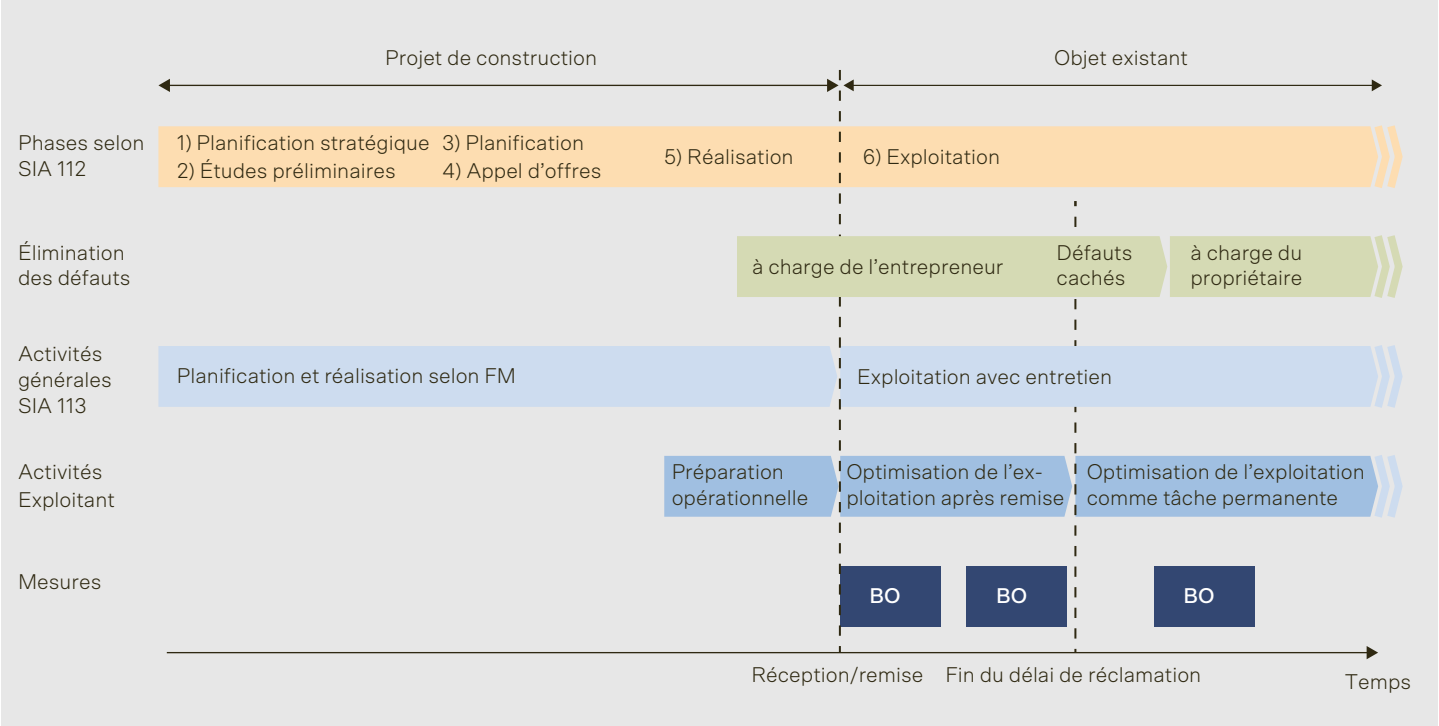


Illustration 11.2: Processus de l'optimisation énergétique de l'exploitation. (Source: Andreas Genkinger, basé sur le Cahier technique SIA 2048)

des besoins (p. ex. convertisseur de fréquence, mises en circuit progressives, connexions en cascade) en mode réel (p. ex. au moyen d'analyses de tendances); contrôler le fonctionnement et les coefficients d'efficacité énergétique d'installations pertinentes sur le plan énergétique (p. ex. machines frigorifiques, RC, pompes à chaleur, utilisations des rejets thermiques, installations solaires); optimiser les courbes de chauffe et de refroidissement; optimiser l'équilibrage hydraulique.

Remarque: Il convient également d'accorder une attention particulière à la mise en service et à la maintenance de l'enregistrement des valeurs de mesure. Il s'agit notamment de vérifier la pertinence des valeurs de mesure enregistrées. L'établissement et la vérification des bilans énergétiques ont fait leurs preuves à cet égard. Sont considérées comme tâches permanentes les tâches suivantes (entre autres):

- évaluation des données énergétiques pertinentes et comparaison avec les valeurs de consigne ou de référence; contrôles réguliers du fonctionnement et des coefficients d'efficacité énergétique des installations d'utilisation des rejets thermiques et de récupération de chaleur (p. ex. utilisation de la chaleur de condensation dans les gaz de combustion) ainsi que des installations pour l'utilisation des énergies naturelles (p. ex. installations solaires, pompes à chaleur); mesures en vue de l'augmentation de l'efficacité énergétique et de son effet; identification de mesures en cas de changements d'affectation (avec contrôle des résultats); analyses des tendances et mesures temporaires.
- Le cahier technique SIA comprend également une liste de contrôle, dont les données doivent être relevées (le cas échéant). Les principaux points sont les suivants:
- Année de construction de l'installation (et des éventuelles rénovations)
- Données des compteurs des exploitants du réseau et sociétés d'approvisionnement (électricité – séparément si possible pour les pompes à chaleur –, gaz, mazout, chaleur à distance, eau): idéalement les trois dernières années sous forme de valeurs hebdomadaires (au moins sous forme de valeurs mensuelles ou annuelles). Dans les cas des gros consommateurs, l'exploitant de réseau (distributeur de gaz ou d'électricité) fournit des valeurs par ¼ d'heure sous forme de tableaux au format électronique.
- Données de (sous-)compteurs privées
- États actuels des compteurs
- Données d'exploitation (p. ex. heures de fonctionnement par niveau de brûleur, des installations de ventilation, de la pompe à chaleur etc.).
- Générateurs de chaleur (supplémentaires)

Les points à vérifier lors de l'évaluation et de l'analyse des pompes à chaleur et des machines frigorifiques sont les suivants:

- Fluide frigorigène utilisé
- Températures du fluide frigorigène ou de l'eau froide demandées, adaptation de ces températures en fonction des besoins
- Températures de l'accumulateur
- Simultanéité de la production, de la distribution et du stockage du froid (tenir compte des temps de démarrage)
- Concentration du produit antigel dans les conduites de refroidissement en retour
- Compresseur avec convertisseur de fréquence
- Démarreur progressif
- Systèmes de refroidissement en retour, utilisation des rejets thermiques
- Températures de condensation et d'évaporation
- Durées de fonctionnement (par niveau de compresseur)
- Réduction de fonctionnement ou arrêt de l'installation (la nuit, le week-end,

les jours fériés, pendant les vacances), réglage prospectif
- Point de fonctionnement, rendement à charge partielle et à pleine charge
- Freecooling (dérivation de la machine frigorifique), exploitation mixte
- Réglage séquentiel en cas de plusieurs installations de refroidissement
- Propreté des composants

Catalogue de mesures: voir «Bases pour l'optimisation de l'exploitation d'installations techniques complexes». Mesures par domaine. Ce document présente les mesures d'optimisation possibles et leur potentiel d'économie.

11.5 Dysfonctionnement et réparation des pannes

Il convient d'éviter de manière appropriée le dysfonctionnement des pompes à chaleur. Les principales causes de dysfonctionnement sont présentées dans l'Illustration 11.3.

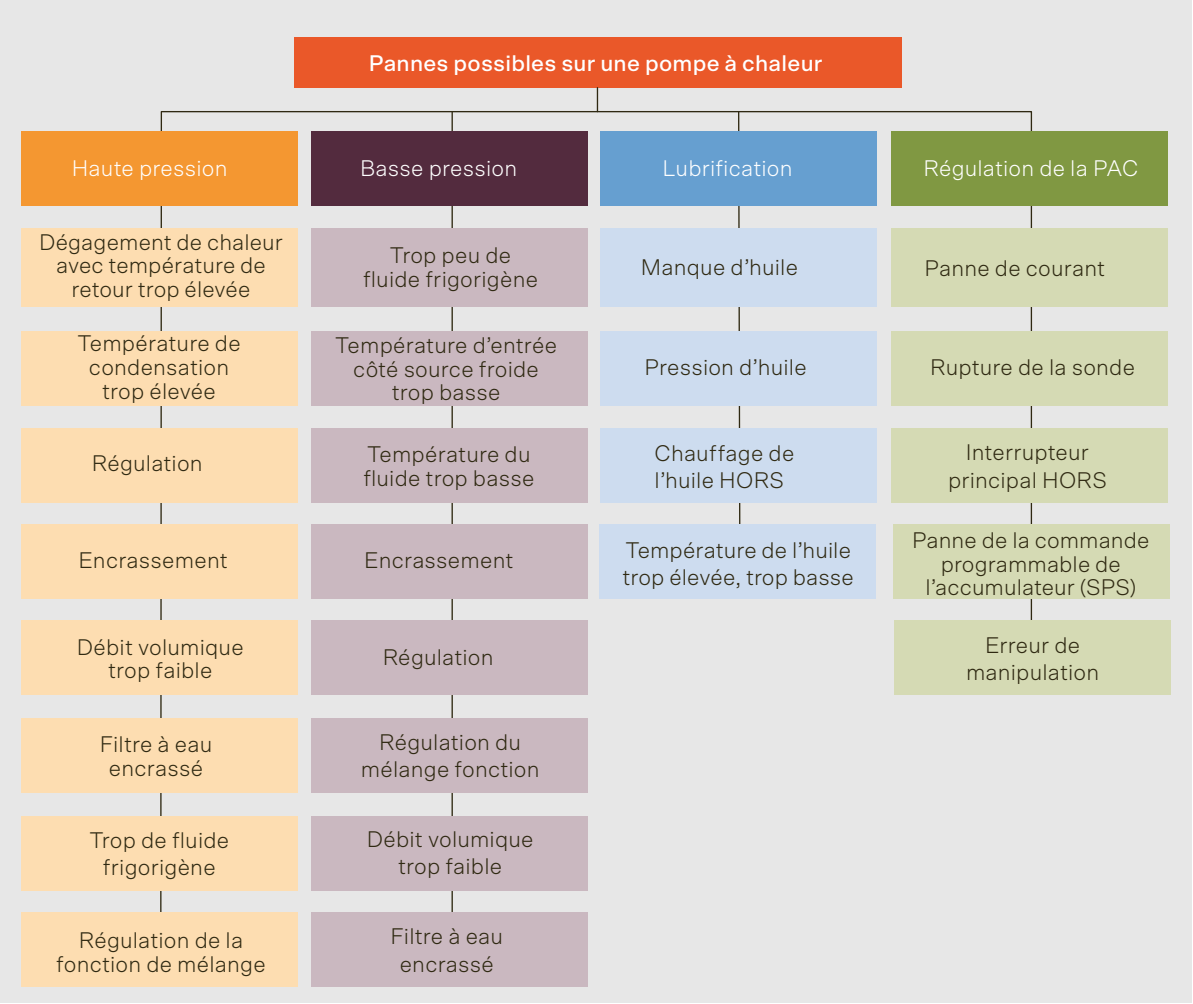


Illustration 11.3: Possibilités de pannes et origine sur les installations de pompes à chaleur.

Chapitre 12

Installations de grande puissance

12.1 Généralités

Les installations de pompe à chaleur d'une puissance de chauffage supérieure à 20 kW couvrent des tâches différentes. Elles se distinguent par leur application, leur finalité, leur niveau de température, leur capacité de charge partielle et leur éventail de fonctions requises. S'agissant de leur utilisation prévue, ces installations sont souvent destinées à chauffer et refroidir les bâtiments, à produire de l'eau chaude, mais aussi, de plus en plus, à générer de la chaleur pour les processus industriels.

Les bâtiments de grande taille peuvent nécessiter une puissance de chauffage comprise entre 20 et 350 kW, parfois plus. Par ailleurs, les applications industrielles et de processus, telles que la production de vapeur, peuvent exiger l'utilisation d'installations spéciales dont la puissance de chauffage est susceptible d'atteindre plusieurs mégawatts. Ce domaine fait souvent l'objet d'une intégration de processus au cours desquels la pompe à chaleur est incorporée à l'ensemble du concept de fonctionnement et d'exploitation. En outre, les installations de chauffage à distance et de chauffage de proximité, un autre domaine d'application important, fonctionnent également avec des puissances similaires.

L'Illustration 12.1 représente la répartition des puissances de chauffage installées selon les plages de puissance respectives des chaudières au gaz ou au mazout et des pompes à chaleur qui ont été vendues en 2024. Ces diagrammes permettent de bien identifier que les applications dont les puissances sont inférieures à 20 kW ont été réalisées en majeure partie avec des pompes à chaleur. Dans le cas de puissances plus élevées, les besoins ont souvent été couverts par des chaudières au gaz et au mazout. Une production accrue conjuguée à l'offre et l'utilisation de pompes à chaleur de grande taille permettra de réduire une telle proportion à l'avenir.

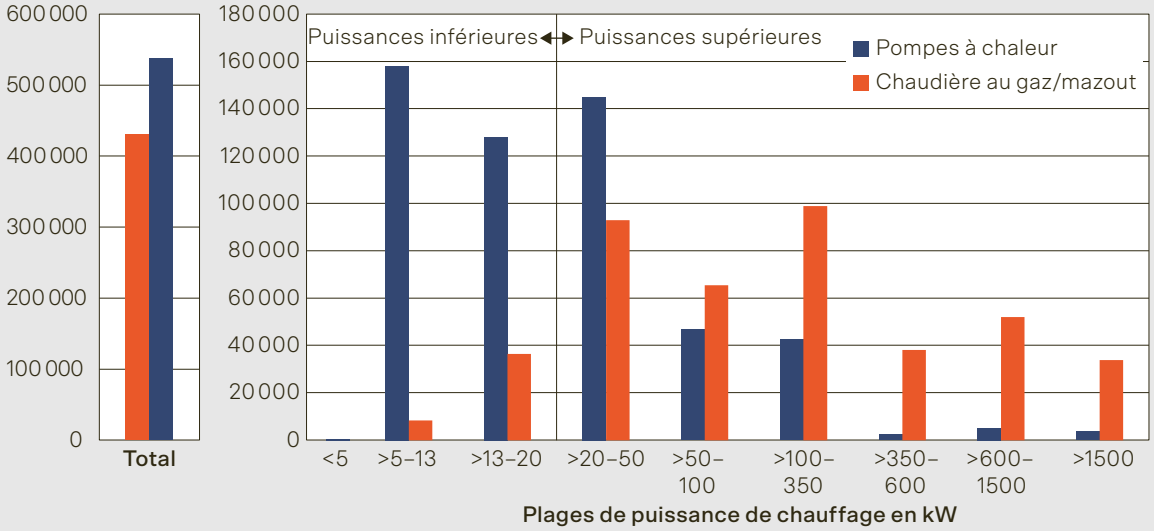


Illustration 12.1: Comparaison des puissances de chauffage installées des chaudières au gaz et au mazout et des pompes à chaleur pendant l'exercice 2024; comparaison par groupes de puissance.
* Les puissances de chauffage moyennes ont été définies avec des puissances de 4, 10, 17, 40, 80, 260, 500, 1200 et 1800 kW et elles ont été multipliées par le nombre d'appareils vendus. (Source: FHNW/INEB)

12.2 Intégration

Dans le cas d'installations présentant une plus grande puissance et un nombre d'heures de service élevé, leur intégration correcte dans le système de chauffage est d'autant plus importante, car il est nécessaire de recourir à de fortes puissances électriques pendant une longue période. Une telle situation génère de fortes consommations d'énergie susceptibles d'entraîner des coûts d'exploitation considérables.
C'est la raison pour laquelle une efficacité opérationnelle maximale constitue un paramètre crucial pour ce type d'installation.
Les pompes à chaleur mal intégrées ne sont pas capables de compenser les insuffisances d'un approvisionnement en chaleur. La bonne capacité d'adaptation de la pompe à chaleur aux conditions d'exploitation (températures de la source et du puits, débits) constitue un avantage non négligeable d'un point de vue opérationnel. Cette caractéristique présente toutefois un inconvénient: les erreurs de l'installation sont «atténuées» par la pompe à chaleur. Certes, la machine chauffe et fonctionne sans connaître de défaillance. Toutefois, elle consomme plus d'électricité que nécessaire et sa longévité en pâtit. Un tel dysfonctionnement est souvent détecté trop tardivement, voire pas du tout. Les comparaisons effectuées régulièrement en fonction des données de planification et des optimisations de l'exploitation revêtent donc un caractère important.
Par conséquent, les pompes à chaleur doivent être impérativement intégrées à la technique du bâtiment d'une manière appropriée. Dans le cas des installations de petite taille qui dominent le marché, il est possible de trouver des composants standard adaptés et de s'appuyer sur des recommandations et des directives. Tous ces éléments et documents permettent de concevoir, de dimensionner, d'installer et de mettre en service ces installations d'une façon optimale afin de garantir leur longévité et leur efficacité. Ils englobent les processus d'assurance de la qualité, les outils de dimensionnement, les circuits et schémas hydrauliques standard, les différents types de documentation, les listes de contrôle et d'autres éléments définis dans le cadre du PAC-SM pour des puissances de chauffage allant jusqu'à 15 kW. Ces exigences sont reconnues par les planificateurs et elles sont correctement mises en œuvre par les installateurs.
Les installations de pompe à chaleur de grande taille sont soumises à l'application de recommandations et de directives très similaires. Les exigences techniques du PAC-SM sont donc généralement applicables à des installations simples dont la puissance ne dépasse pas 100 kW.
Alors que le PAC-SM a permis d'introduire principalement des standards relatifs aux schémas hydrauliques, aux exigences concernant les accumulateurs, aux critères de dimensionnement et autres listes de contrôle, les pompes à chaleur de grande taille sont soumises à des contraintes généralement plus complexes et spécifiques. C'est la raison pour laquelle elles sont très souvent mises en œuvre sous la forme de solutions individuelles sur mesure. En outre, l'intégration d'une machine dans un processus industriel s'avère particulièrement complexe lorsque des états de charge partielle et des températures différentes doivent être atteints.
Par ailleurs, le principe suivant s'applique à toutes les applications: un concept de sécurité doit faire partie intégrante du concept de l'installation.
Les pompes à chaleur de grande taille sont souvent utilisées dans les conditions suivantes:

- bâtiments individuels
- approvisionnements en chauffage pour lotissements
- systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité
- applications industrielles (chaleur, froid)

12.3 Bâtiments individuels

Parmi les applications pour bâtiments individuels figurent la fourniture de chaleur pour le chauffage et la production d'eau chaude, ainsi que la fourniture de froid pour le refroidissement des bâtiments et leur climatisation. Dans le cas des bâtiments d'habitation, la priorité est accordée à la couverture des besoins en chaleur. Pour les bâtiments commerciaux et industriels, les administrations et les halles de production, la fourniture de froid est également exigée. Toutefois, il est prévisible et envisageable que le réchauffement climatique entraîne également une augmentation du nombre d'applications de refroidissement pour les bâtiments d'habitation. Si la puissance de l'évaporateur et celle du condenseur sont utilisées simultanément, cette configuration constituera alors l'application la plus efficace de la pompe à chaleur.
Le comportement thermique d'un bâtiment dépend de différents facteurs, tels que sa structure, sa conception, la technique de façade, les conditions météorologiques et les installations techniques.
Avant de pouvoir s'atteler aux optimisations énergétiques, il est tout d'abord nécessaire de disposer de bonnes connaissances concernant le comportement thermique du bâtiment. Un tel savoir permet d'une part de conseiller les résidents en matière de comportement énergétique et d'améliorer leur confort et, de l'autre, de faire baisser les coûts de l'énergie et, dans l'idéal, de réduire au préalable les besoins en chauffage en améliorant l'enveloppe du bâtiment. Dans ce contexte, il est toujours indispensable de rechercher un compromis au moment de choisir la bonne solution de pompe à chaleur ou le bon concept de rénovation d'un chauffage.
Les facteurs suivants jouent également un rôle important et en partie décisif à cet égard:

- l'espace disponible dans le bâtiment
- la disponibilité et l'intégration des sources et des puits de chaleur
- le comportement en matière de charge de chauffage ou de refroidissement du bâtiment
- les options possibles pour la disposition et le passage des conduites
- les exigences concernant le bruit
- et les exigences relatives à l'efficacité

Les différentes solutions disponibles sont plus ou moins simples à mettre en œuvre dans le cas d'un bâtiment neuf ou d'une rénovation du chauffage. Les conditions de chaque site constituent généralement un facteur décisif, notamment pour les rénovations de chauffages. De plus, des problèmes de place sont souvent susceptibles de se poser.
Dans le cas des bâtiments neufs, les applications de chauffage s'avèrent très efficaces pour des systèmes de fourniture de chaleur à basses températures de sortie s'élevant à 35 °C maximum. S'agissant des rénovations et des remplacements de chauffages, des températures de sortie supérieures sont souvent nécessaires, ce qui réduit toutefois l'efficacité.
Les puissances nominales des pompes à chaleur pour immeubles collectifs de taille moyenne sont comprises entre 30 et 100 kW pour les bâtiments existants et entre 15 et 50 kW pour les bâtiments neuf bien isolés. Pour les bâtiments commerciaux et industriels, les valeurs sont généralement plus importantes.
Dans le cas de la production et de la distribution d'eau chaude, il n'est pas simple de parvenir à un niveau d'efficacité élevé, et ce, en raison des hautes températures requises aux points de prélèvement. En effet, la réalisation d'un tel objectif entraîne des pertes de chaleur lors de la distribution et des pertes en matière d'efficacité de stratification dans l'accumulateur d'eau chaude à la suite de la circulation. C'est la raison pour laquelle l'installation doit être bien conçue et que son exploitation

doit être optimisée en termes d'efficacité.
Par ailleurs, il convient de se poser la question suivante: production d'eau chaude centralisée ou décentralisée? Avant d'y répondre, il est recommandé de contrôler la séparation fonctionnelle du chauffage et de la production d'eau chaude au profit d'une efficacité supérieure. En l'occurrence, il est nécessaire de prendre en compte le fait que la fourniture d'eau chaude en Suisse génère une consommation d'électricité importante, car de nombreux bâtiments sont équipés de chauffe-eau électriques. Si ces derniers étaient remplacés par des pompes à chaleur pour eau chaude, il serait alors possible de réduire considérablement la consommation d'électricité. Cette solution n'est pas qu'une option avantageuse pour les exploitants d'installations. Il est aussi impérativement nécessaire de la mettre en œuvre afin de réaliser d'importantes économies d'électricité hivernale.

Variantes d'exécution pour les bâtiments individuels

Pompes à chaleur air/eau, monobloc installées en extérieur: Dans les classes de puissance supérieures, les pompes à chaleur monobloc sont disponibles sous la forme de produits standard jusqu'à une puissance de 100 kW environ. En outre, des appareils initialement conçus pour le refroidissement sont parfois également proposés sur le marché. Les appareils explicitement adaptés à une utilisation de la chaleur fonctionnent généralement d'une manière plus efficace. Une attention particulière sera portée aux émissions sonores étant donné que les pompes à chaleur produisent du bruit en raison d'un débit d'air important. Ainsi, il est possible que des mesures de protection contre le bruit doivent être prises afin de pouvoir établir l'attestation de protection phonique. Des solutions à circuits en cascade pour des appareils de moindre puissance qui peuvent être globalement moins bruyants qu'un grand système constituent également une option.
Pour de plus amples informations, il convient de consulter le chapitre 8 «Acoustique et protection contre le bruit».

Pompes à chaleur air/eau installées en extérieur avec plusieurs appareils de petite taille mis en cascade: Dans le cas de telles pompes à chaleur, plusieurs appareils standard de petite taille sont mis en cascade. La puissance est régulée par l'activation et la désactivation des appareils et par des inverseurs éventuellement disponibles. Une régulation de niveau supérieur permet de piloter et de commander correctement les différentes machines. Pour ce faire, il est important de veiller à un bon équilibrage de charge des appareils. En effet, il convient que l'ensemble des appareils présente plus ou moins le même nombre d'heures de service.
Si plusieurs pompes à chaleur fonctionnent simultanément, alors leurs émissions sonores s'additionnent. Selon l'installation et la position des différents appareils et leur distance entre eux, l'effet produit peut être plus ou moins fort. L'application de mesures de protection spécifiques contre le bruit peut éventuellement suffire à remplir les conditions relatives à l'attestation de protection phonique. En cas de charge partielle, tous les appareils ne fonctionnent pas simultanément, en règle générale.

Pompes à chaleur air/eau, monobloc installées sur un toit: Dans le cas de telles pompes à chaleur, des appareils de plus grande taille sont généralement installés sur des toits plats. Outre les émissions sonores directes, il convient de prendre également en compte le bruit solidien. Les appareils doivent être installés sur une base tendre ou souple et sur des tampons en caoutchouc ou sur des ressorts afin de procéder à leur découplage acoustique. Les conduites

et câbles de raccordement doivent être exécutés d'une manière flexible pour éviter toute transmission de bruits. Une telle exigence s'applique également à toutes les installations de pompe à chaleur en règle générale.
Le raccordement hydraulique au système de chauffage éventuellement existant peut s'avérer complexe. Dans le cas d'un remplacement d'un chauffage, une liaison plus longue doit être souvent prévue pour atteindre la chaufferie ou le local de chauffage. S'agissant d'un bâtiment neuf, une position de montage élevée pour les pompes à chaleur peut être déjà prise en compte dans le concept.

Pompes à chaleur air/eau installées sur le toit avec plusieurs appareils de petite taille mis en cascade: Ce type de pompe à chaleur fait l'objet des mêmes considérations que celles évoquées pour les appareils monobloc montés au sol. Le raccordement hydraulique se fait sous la forme d'un montage en parallèle et la séparation est effectuée au moyen de vannes ou robinets d'arrêt ou de clapets anti-retour. Une régulation de niveau supérieur doit assurer la commande maître-esclave des différentes machines. S'agissant du bruit solidien, les exigences spécifiées pour les appareils monobloc montés sur un toit s'appliquent également aux pompes installées sur un toit avec plusieurs appareils mis en cascade.

Pompes à chaleur air/eau installées en intérieur avec raccordement de conduits: Dans le cas de telles installations, le raccordement de ventilation pour l'air admis et l'air vicié doit faire l'objet d'un dimensionnement suffisant afin d'éviter des vitesses et des bruits d'écoulement trop importants. Les émissions sonores de l'appareil et du ventilateur doivent être éventuellement réduites à des valeurs admissibles au moyen de silencieux pour conduit d'air. Dans le cas d'une rénovation, il est nécessaire de prévoir un espace suffisant et les ouvertures requises pour les conduits d'air. S'agissant d'un bâtiment neuf, la mise en œuvre est plus simple étant donné qu'il est possible de planifier les différentes mesures en amont.

Échangeurs de chaleur à air installés sur un toit, circuit intermédiaire d'eau glycolée et pompe à chaleur eau glycolée/eau dans le bâtiment: Cette solution est souvent choisie pour les bâtiments commerciaux ou industriels



Illustration 12.2: Une grande pompe à chaleur air/eau réversible est installée sur le toit d'un bâtiment historique dans la zone industrielle The Valley. (Source: CTA SA/ EKZ)

étant donné qu'elle se distingue par son caractère évolutif et modulable et par sa flexibilité en termes de mise en œuvre. La pompe à chaleur et ses compresseurs (source sonore) se trouvent à l'intérieur du bâtiment. Ainsi, il est possible de bien maîtriser l'installation en termes de bruit et de vibration. Il est surtout nécessaire de veiller à ce que le transfert de chaleur vers le fluide du circuit intermédiaire s'effectue avec une faible différence de température. Il s'agit du seul moyen de limiter une réduction de l'efficacité à la suite de la course de température légèrement supérieure de la pompe à chaleur. Cette solution est surtout judicieuse pour les besoins en chaleur et en froid qui doivent être couverts simultanément. La solution du circuit intermédiaire offre de très nombreuses possibilités d'intégration hydraulique, notamment en ce qui concerne les capteurs solaires photovoltaïques et thermiques (PVT), les sondes géothermiques (SG) et les accumulateurs de glace. Les accumulateurs de glace constituent une option intéressante lorsqu'une application de refroidissement est couverte en été par l'extraction d'énergie hivernale de l'accumulateur de glace. En effet, l'accumulateur se dégivre et se recharge.

Pompe à chaleur eau glycolée/eau avec raccordement d'une sonde géothermique: La pompe à chaleur eau glycolée/eau avec raccordement d'une sonde géothermique constitue, pour une puissance donnée, l'une des solutions les plus efficaces, mais aussi (et souvent) l'une des plus coûteuses en termes d'investissement. Toutefois, il est recommandé de prendre ce système en considération au moment d'étudier les différentes options susceptibles d'être mises en œuvre. Si le propriétaire de l'installation est également son utilisateur, alors le calcul des coûts complets permettra de mettre en avant les avantages d'une telle solution. Selon la zone de protection des constructions ou des eaux, les sondes géothermiques sont toutefois susceptibles de ne pas être autorisées.
Les appareils monobloc ou les mises en cascade de plusieurs appareils de petite taille sont des concepts courants dont l'objectif vise à pouvoir atteindre certains niveaux de puissance ou à pouvoir garantir des redondances opérationnelles. D'un point de vue acoustique, la pompe à chaleur eau glycolée/eau est un système complexe en ce qui concerne les grandes puissances à l'intérieur des bâtiments. En effet, la propagation du bruit solidien doit être impérativement limitée. La propagation du bruit aérien peut être restreinte par une insonorisation suffisante de la centrale de chauffage.
En raison de l'évolution actuelle dans le domaine des fluides frigorigènes (utilisation accrue du propane R290), un nombre croissant d'appareils à installer en extérieur font leur apparition sur le marché. Cette situation présente plusieurs avantages en matière de protection contre les incendies et les explosions. Néanmoins, des solutions plus simples en matière d'exigences de sécurité commencent également à voir le jour dans le secteur des appareils installés en intérieur. Parmi ces derniers figurent des détecteurs de gaz, des ventilations tempête et d'autres procédés qui permettent de réduire la concentration de propane dans l'air à un niveau inférieur à la limite d'inflammabilité.

Pompes à chaleur eau/eau avec utilisation des eaux de lac, des eaux souterraines, des eaux usées ou des rejets thermiques: Les pompes à chaleur eau/eau atteignent un niveau d'efficacité maximal lorsqu'elles fonctionnent avec des températures de source élevées (eaux de lac, eaux souterraines, eaux usées ou rejets thermiques). C'est la raison pour laquelle il est recommandé de toujours contrôler si de telles sources sont disponibles à proximité et s'il est possible de les raccorder.

12.4 Lotissements

Plusieurs concepts de réalisation sont déjà établis. Ils se distinguent principalement en fonction des éléments suivants: le lieu d'installation des pompes à chaleur pour les différents niveaux de température et de puissance exigés, l'utilisation des pompes à chaleur à des fins de chauffage et de production d'eau chaude et la répartition de leur fonction en plusieurs systèmes.

Production de chaleur centralisée: Elle permet généralement de garantir, à titre d'exemple, l'approvisionnement du bâtiment le plus éloigné à une température suffisante. Dans le cas des installations au gaz et au mazout, la température de départ minimale est réglée en fonction du bâtiment qui requiert les températures les plus hautes ou en fonction du bâtiment qui se trouve le plus loin de la source. S'agissant des installations de pompe à chaleur, les niveaux de température et la course de température jouent un rôle décisif en matière d'efficacité. C'est la raison pour laquelle il est éventuellement nécessaire de trouver une solution spéciale pour le bâtiment le plus éloigné, par exemple sous la forme d'une pompe à chaleur booster, au moment de considérer les différents systèmes.

Dans le cas d'un remplacement d'un système de chauffage existant à énergie fossile par une solution de pompe à chaleur, il est indispensable de contrôler la façon dont les différentes fonctions seront couvertes et les endroits où celles-ci seront exécutées. L'exemple suivant illustre ce cas de figure. Un lotissement existant est chauffé de manière centralisée avec un chauffage au mazout dans une chaufferie ou un local de chauffage. L'eau chaude est produite par des chauffe-eau électriques dans les différents bâtiments et logements. Par ailleurs, une pompe à chaleur eau glycolée/eau avec sonde géothermique (source) est nouvellement planifiée.
Si les systèmes d'émission de chaleur dans les bâtiments conviennent à des températures de sortie basses, le départ du chauffage peut être également maintenu à un faible niveau à partir de la centrale. Si l'eau chaude est également produite et stockée d'une manière centralisée (par exemple avec la même machine), il est alors indispensable de veiller à l'hygiène dans la distribution. Pour ce faire, une circulation avec traçages assurant une température suffisante de l'eau qui circule est éventuellement requise. Toutefois, une énergie considérable est



Illustration 12.3: Cette pompe à chaleur pour eaux souterraines dans la centrale de Badus alimente un réseau de chauffage à distance à Coire. (Source: CTA SA/ IBC Energie Wasser Chur)

nécessaire à cette fin, ce qui réduit notablement l'efficacité de l'ensemble du système.

Production de chaleur de chauffage centralisée et production d'eau chaude décentralisée: Une pompe à chaleur centralisée est utilisée uniquement pour la production de chaleur de chauffage dans cette configuration. La production et le stockage d'eau chaude s'effectuent d'une manière décentralisée dans les différents bâtiments. Ces processus requièrent l'utilisation de pompes à chaleur décentralisées qui puisent leur énergie (source) du circuit de chauffage, de l'air extérieur ou du système à sondes géothermiques.

Production de chaleur décentralisée: Le remplacement d'une pompe à chaleur centralisée par plusieurs pompes à chaleur décentralisées dans les différents bâtiments constitue une autre solution. Ces dernières sont raccordées au même système à sondes géothermiques. Les pompes à chaleur peuvent également produire l'eau chaude destinée au bâtiment qu'elles doivent alimenter. Cette solution comporte une source à sondes géothermiques partagées. Avant de se décider en faveur d'un système, il est nécessaire de comparer les différentes variantes en fonction de leur efficacité, de leur possibilité de mise en œuvre, de leur complexité, de leurs coûts d'investissement et d'exploitation, des coûts de revient de la chaleur et de leur entretien.

Tableau 12.1: Catégories de réseaux de chauffage à distance et de chauffage de proximité avec les niveaux de température courants pour les différents usages prévus.

Catégorie	Niveau de température du conducteur de chaleur (t_{cc})
Réseau à haute température	$t_{cc} \geq 60\,°C$
Réseau à basse température	$60\,°C > t_{cc} \geq 0\,°C$
– Chauffage	$60\,°C > t_{cc} \geq 30\,°C$
– Préchauffage	$30\,°C > t_{cc} \geq 20\,°C$
– Refroidissement, anergie	$20\,°C > t_{cc} \geq 0\,°C$

12.5 Systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité

Les systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité ont pour fonction d'assurer une production de chaleur générale à diverses fins selon les bâtiments raccordés et leurs applications prévues. On distingue les réseaux à haute température et les réseaux à basse température (chauffage, préchauffage et refroidissement/anergie). Les températures sont indiquées dans le Tableau 12.1.
Les systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité avec pompes à chaleur sont particulièrement efficaces lorsque le froid peut être utilisé simultanément. Les puissances sont élevées et, outre les compresseurs à piston et à vis, un nombre croissant de turbocompresseurs à palier magnétique exempts d'huile qui conviennent très bien à de faibles courses de température sont également utilisés. Les réseaux d'anergie constituent des solutions efficaces lorsqu'il est possible de combiner différentes utilisations comme le chauffage et le refroidissement avec des accumulateurs saisonniers à sondes géothermiques.

12.6 Applications industrielles

Les applications industrielles constituent une catégorie particulière. Des températures de sortie comprises entre 70 et 150 °C sont souvent nécessaires. Ces applications individuelles requièrent des températures qui dépassent même les 200 °C. Elles représentent environ 20 % des besoins globaux en énergie. Les applications actuelles sont fréquemment réalisées avec des chaudières à énergie fossile qu'il va convenir de remplacer au cours des prochaines années.
Les applications industrielles requièrent des pompes à chaleur à haute température qui sont tout particulièrement dimensionnées et fabriquées sur com-

mande le plus souvent. L'efficacité de telles pompes à chaleur est moins importante en raison de leur course de température élevée. Si les installations sont judicieusement intégrées dans les processus, elles sont néanmoins capables d'obtenir des taux d'utilisation satisfaisants pour l'ensemble du système. L'Illustration 12.4 représente les niveaux d'efficacité susceptibles d'être atteints. Les valeurs COP reposent sur une température de source supposée de 40 °C et sont indiquées en fonction de la course de température et des rendements (Carnot: 100 %, 60 %, 45 % et 30 %).

12.7 Planification et mise en œuvre

Le domaine d'application d'une pompe à chaleur définit les exigences concernant sa puissance et ses fonctions, et ce, notamment dans les secteurs industriels et commerciaux, dans les bâtiments d'habitation ou pour le chauffage à distance. Afin de procéder à la planification, il est nécessaire de connaître suffisamment les courbes de charge des besoins en chauffage et en refroidissement. Les courbes de charge annuelle qui en résultent sont ensuite consultées pour choisir le système approprié en fonction de la couverture de la charge en ruban, de la charge partielle et des pics de consommation compte tenu d'un point de bivalence éventuellement disponible. Ce processus permet de définir le nombre de pompes à chaleur, leurs puissances et leur source d'énergie qu'il est judicieux de prévoir en fonction de leur usage prévu. Le domaine d'application des pompes à chaleur doit être fixé et les cycles frigorifiques doivent être éventuellement modifiés selon l'utilisation choisie. L'analyse des interfaces pose les fondations d'une intégration de l'installation dans les systèmes de chauffage existants, y compris le raccordement des accumulateurs et l'interconnexion de la commande et de la régulation.

Le dimensionnement commence par le choix des éléments suivants:

- la source de chaleur (air, eaux souterraines, eaux de lac, terre, rejets thermiques, chaleur des processus, etc.)
- le compresseur (puissance, course de température, domaine d'application)
- et le fluide frigorigène (impact sur l'environnement, valeur GWP, inflammabilité, domaine d'application, etc.)

Selon le concept, il est possible d'intégrer plusieurs types de sources. Cette intégration peut notamment s'effectuer d'une manière saisonnière en raison de l'efficacité ou en fonction de la disponibilité.

Les puissances sont ensuite dimensionnées à partir du calcul de la charge thermique avec les températures de départ et de retour requises. Des besoins simultanés en chaleur et en froid qui entraînent une augmentation du taux d'utilisation du système doivent être éventuellement couverts. Le comportement à charge partielle requis doit être défini et contrôlé. L'efficacité et la disponibilité fonctionnelle constituent les principaux critères d'évaluation.

Le concept hydraulique comportant des accumulateurs tampons, des vannes mélangeuses, des vannes d'inversion,

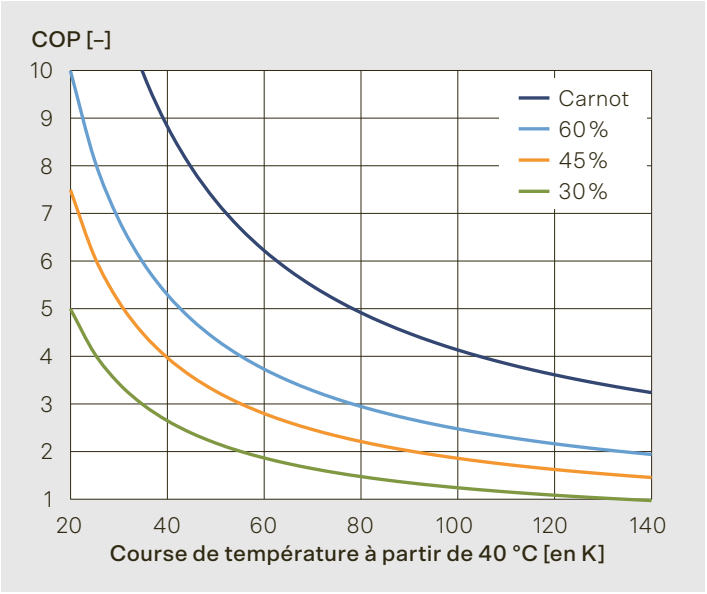


Illustration 12.4: COP atteignables avec des pompes à chaleur à haute température en fonction du rendement de Carnot et de la course de température. (Source: FHNW/INEB)

des clapets anti-retour, des pompes et des instruments comme les compteurs de chaleur et les points de mesure de température doit être élaboré. Pour ce faire, les tailles des accumulateurs, les débits et les pertes de pression sont déterminés pour le dimensionnement des pompes et les composants sont ensuite sélectionnés en conséquence.
La technique de stockage joue un rôle essentiel en matière d'efficacité et de capacité de réglage pour les systèmes de pompe à chaleur. Les accumulateurs tampons servent à découpler la production de chaleur de la consommation et à réduire le fonctionnement cadencé de la pompe à chaleur. Les accumulateurs à stratification permettent de procéder à une stratification efficace des températures qui s'avère avantageuse pour les systèmes à températures de source variables, notamment dans le cas d'une utilisation combinée d'une pompe à chaleur et du solaire thermique.
Les pompes à haute efficacité (IEE < 0,23) équipées d'un dispositif de régulation de la pression différentielle et de la vitesse réduisent la consommation d'énergie de la circulation. Les débits minimaux de la pompe à chaleur doivent être toutefois garantis conformément aux indications du fabricant. Les systèmes de maintien de la pression, tels que des vases d'expansion à membrane ou des pompes de maintien de la pression, stabilisent la pression de service et assurent ainsi un fonctionnement efficace.
Lors de l'analyse de rentabilité, les coûts du cycle de vie (coûts d'investissement et d'exploitation), soit la durée d'amortissement, sont regroupés et établis compte tenu d'une éventuelle subvention et d'autres éléments relatifs à l'évaluation de l'installation. S'agissant des autorisations, les exigences environnementales, les prescriptions en matière de construction et les conditions de raccordement au réseau doivent être satisfaites afin de les obtenir. Pour de plus amples informations, il convient de consulter les chapitres 6 à 9.

Planification: installation, concept de sécurité, autorisations
Le choix du site doit être vérifié en fonction des paramètres suivants: le type d'installation (dans le bâtiment ou en extérieur), l'espace requis et l'accessibilité pour la maintenance.
L'acheminement et la livraison des composants doivent être planifiés avec soin. Le fluide frigorigène prévu joue un rôle important lors la planification d'une installation. Le concept de sécurité permet de consigner les mesures nécessaires qui doivent être mises en œuvre lors de sa réalisation. Par ailleurs, les autorisations relatives à l'utilisation du fluide frigorigène concerné doivent être éventuellement demandées.

Planification: alimentation électrique, surveillance et communication
Dans le cas de l'infrastructure électrique, il convient de concevoir le raccordement au réseau et les concepts de transformateurs et de fusibles et de définir la technique de commande et de régulation. Une surveillance des données essentielles, telles que la puissance de chauffage, la puissance électrique absorbée, le COP et les températures de la source et du puits, est nécessaire. La collecte des données de mesure, l'enregistrement des données et la communication doivent être planifiés avec soin et en concertation avec l'exploitant. Ces processus doivent être surtout bien coordonnés. Pour ce faire, il convient de tenir compte des éléments suivants: le concept de mesure, la sécurité des données, la visualisation, l'automation, la télécommande, la télémaintenance, les types de bus de terrain, etc.
La planification de l'alimentation électrique permet de définir également les points d'installation des compteurs électriques. Si des indicateurs, tels que le COP, le COPA ou les taux d'utilisation du système, sont déterminés d'une façon fiable, les points d'installation doivent être alors choisis conformément aux indications de l'Illustration 1.7.

Il en va de même pour les compteurs de chaleur et éventuellement pour les compteurs de froid qui permettent de mesurer les puissances de chauffage et les puissances frigorifiques. Il convient également de consulter le chapitre 9.8 «Dispositifs de mesure». Ces derniers sont pris en compte lors de la planification hydraulique.

Installation et montage

La pompe à chaleur doit pouvoir être livrée. Autrement dit, les ouvertures du bâtiment et les dispositifs de levage doivent être disponibles sur le site d'installation. Dans le cas d'une rénovation ou d'un remplacement d'un chauffage, cette condition à remplir est susceptible de porter une atteinte substantielle au tissu du bâti. Le lieu d'installation est préparé conformément aux instructions du fabricant de la pompe à chaleur. À titre d'exemple, les fondations, l'évacuation des condensats et la possibilité d'une infiltration ou d'un ruissellement de l'eau de condensation constituent des points essentiels à prendre en compte.
Dans le cas du système hydraulique et de la tuyauterie, le circuit prévu est mis en œuvre, le choix des matériaux et des matériels est pris en compte et l'isolation et la protection contre la corrosion sont exécutées. La protection contre le bruit est mise en œuvre conformément à la planification.

Mise en service

Les grandes pompes à chaleur sont toujours mises en service en plusieurs étapes. Avant de mettre en service le compresseur, les circuits de la source et du puits sont purgés et mis en service et les fonctions des vannes et des pompes sont contrôlées. Ce n'est qu'après avoir réalisé ces opérations que le compresseur est mis en marche. Sa puissance absorbée et les températures de la source et du puits sont saisis conformément aux indications de la liste de contrôle.

L'équilibrage hydraulique de l'installation constitue un processus important. Il vise à garantir l'obtention de débits et d'écarts de température optimaux. Sans appliquer une telle mesure, l'installation fonctionnerait éventuellement avec des températures trop élevées afin de pouvoir également approvisionner avec une chaleur suffisante (froid) les consommateurs critiques comme les pièces d'angle ou les utilisateurs éloignés.
Les tests électriques suivants sont ensuite effectués. La protection est contrôlée, au même titre que la régulation et la communication avec le système d'automation du bâtiment. L'efficacité est également vérifiée en parallèle et les paramètres sont adaptés afin d'assurer une première optimisation de l'exploitation. Pour de plus amples informations, il convient de consulter le chapitre 10 «Mise en service». Les mises en œuvre proposées dans ce chapitre se réfèrent certes à des pompes à chaleur de petite taille ou de taille moyenne. Toutefois, certains éléments peuvent être repris de façon analogue pour des pompes à chaleur de grande taille.

Optimisation de l'exploitation et maintenance

Une optimisation efficace de l'exploitation nécessite une surveillance de l'installation qui comprend la collecte des données et leurs analyses à long terme. L'efficacité peut être améliorée par des adaptations des éléments suivants: les températures de départ, les débits volumiques, les stratégies de stockage et la gestion de la charge.
Les différentes possibilités de télémaintenance permettent de détecter des pannes et de les éliminer. Une maintenance effectuée à intervalles réguliers (nettoyage des filtres et des échangeurs de chaleur, contrôles du fluide frigorigène, inspection des pompes et des vannes, etc.) garantit une exploitation efficace.
Il est recommandé de toujours contrôler d'éventuelles adaptations du système à

long terme. Parmi ces ajustements figurent des optimisations des heures de service et des intégrations au système, et ce, notamment dans le cas d'une utilisation combinée avec une installation photovoltaïque. Pour de plus amples informations, il convient de consulter le chapitre 11 «Exploitation».

Chapitre 13

Exemples concrets

13.1 Installations de petite taille

Nous présentons ci-après les schémas de fonctionnement éprouvés sur le plan de la sécurité de fonctionnement et de l'efficacité énergétique pour les très petites installations (jusqu'à env. 15 kW) dans les bâtiments d'habitation. Il s'agit des schémas de connexion tels qu'exigés également par le PAC Système-Module. Les variantes hydrauliques suivantes sont représentées:

Exemple	Page
Sans accumulateur, sans production d'eau chaude	142
Sans accumulateur, avec production d'eau chaude	142
Accumulateur en série, sans production d'eau chaude	143
Accumulateur en série, avec production d'eau chaude	143
Accumulateur en parallèle, sans production d'eau chaude	144
Accumulateur en parallèle, avec production d'eau chaude	145
Accumulateur en parallèle, avec appoint solaire pour la production d'eau chaude	145

Sans accumulateur, sans production d'eau chaude

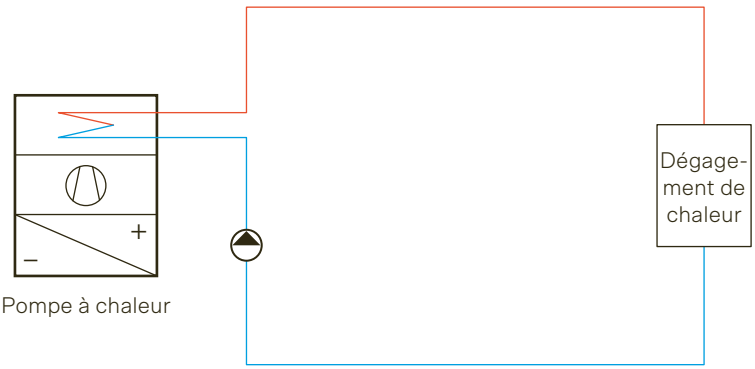


Illustration 13.1: La commande la plus simple.

Dans le cas des chauffages au sol, la chape peut servir de masse d'accumulation thermique, un accumulateur technique pour assurer la transition entre les temps de délestage (éventuels) n'est pas (obligatoirement) nécessaire. Le système hydraulique est destiné aux installations présentant des températures de départ au point de calcul inférieures à 30 °C, qui fonctionnent sans réglage par pièce (utilisation de l'effet d'autorégulation). En cas de températures de départ plus élevées, la loi prescrit un réglage par pièce. Dans ce cas, il convient de respecter le débit massique minimal requis de la pompe à chaleur, par exemple par le biais d'une soupape de décharge montée en parallèle pour le dégagement de chaleur.

Sans accumulateur, avec production d'eau chaude

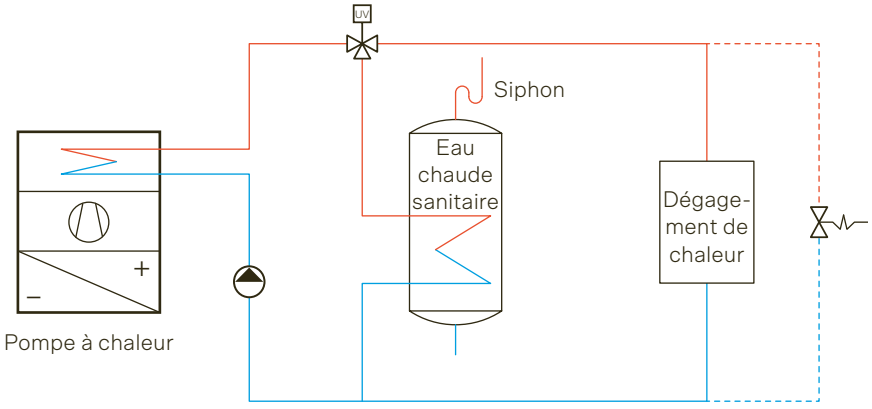


Illustration 13.2: Une configuration fréquente (chauffe-eau parallèlement au chauffage des pièces).

Dans la mesure du possible, une pompe à chaleur devrait fournir le chauffage ainsi que la production d'eau chaude sanitaire. La commutation s'effectue sans problème grâce à une vanne à 3 voies. Il faut être attentif à la puissance de chauffage des pompes à chaleur sans régulation de la puissance en mode été (production d'eau chaude sanitaire), qui est quasiment doublée par rapport au mode hiver. Cela exige une surface suffisamment grande de l'échangeur de chaleur dans l'accumulateur d'eau chaude. Elle devrait mesurer, dans l'idéal, 0,4 m^2/kW, par rapport à la puissance maximale de la pompe à chaleur. Dans le cas des systèmes de dégagement de chaleur avec vannes thermostatiques (réglage par pièce), la soupape de décharge garantit également le respect d'un débit massique minimal de la pompe à chaleur.

Accumulateur en série, sans production d'eau chaude

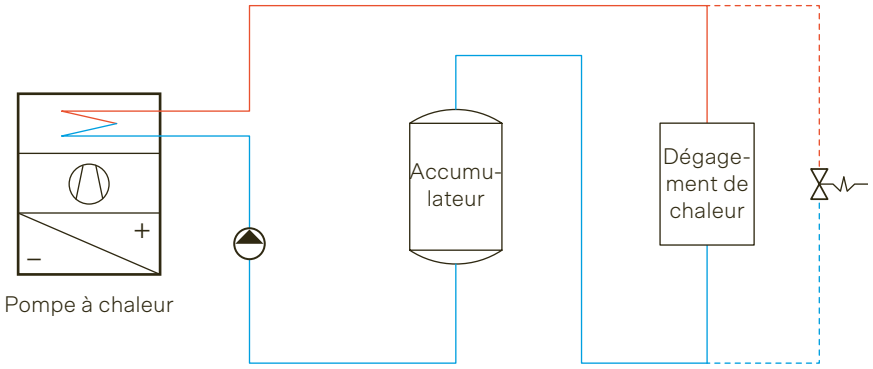


Illustration 13.3: Accumulateur de chaleur en série pour petits bâtiments.

Le faible volume d'eau contenu dans l'installation de chauffage (chauffages par radiateurs, petits bâtiments à chauffage au sol) entraîne de fréquents cycles de commutation d'activation et de désactivation de la pompe à chaleur. Il est possible de contrecarrer cela avec un accumulateur en série. Il convient de choisir l'accumulateur conformément aux indications du fabricant et de la taille la plus petite possible. Lorsqu'une pompe à chaleur air-eau est dégivrée en mode inversé, un volume supérieur est donc nécessaire, la chaleur étant prélevée du système de chauffage en mode dégivrage. En cas de faible volume d'eau dans l'installation de chauffage, le condenseur peut, dans le pire des cas, geler et par conséquent éclater.

Accumulateur en série, avec production d'eau chaude

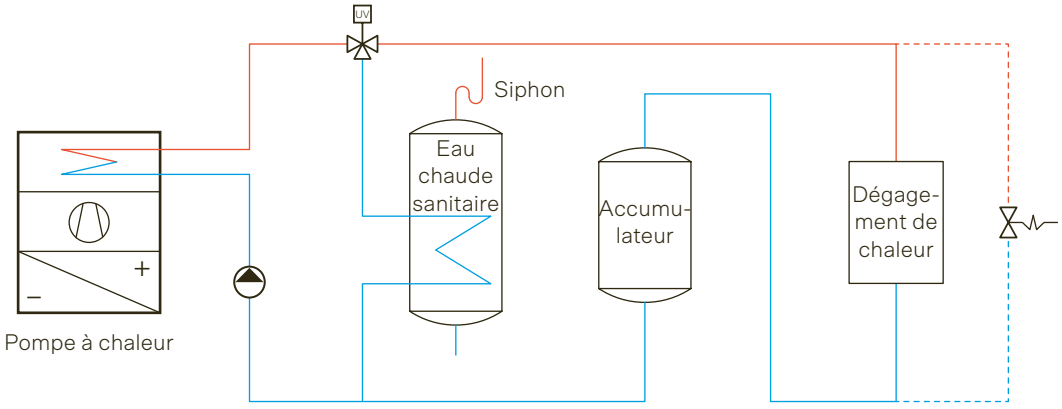


Illustration 13.4: Accumulateur de chaleur en série avec chauffe-eau en amont.

Le schéma correspond à l'installation «Accumulateur en série, sans production d'eau chaude», mais avec chauffage de l'eau chaude sanitaire supplémentaire. Son raccordement hydraulique – au niveau de la pompe à chaleur – devrait être effectué avant l'accumulateur en série. Sinon, celui-ci sera également chauffé en cas de charge d'eau chaude sanitaire (à un niveau de température trop élevé).

Accumulateur en parallèle, sans production d'eau chaude

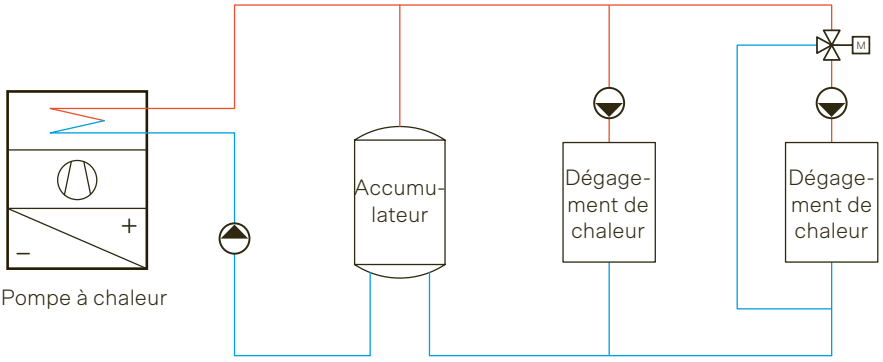


Illustration 13.5: L'accumulateur de chaleur permet un découplage hydraulique.

Le circuit hydraulique engendre par le biais de l'accumulateur d'eau chaude monté en parallèle – en plus du stockage d'énergie – un découplage hydraulique: entre le circuit de charge et de décharge (c.-à-d. la pompe à chaleur et le système de dégagement de chaleur). La pompe à chaleur peut, de ce fait, fonctionner indépendamment du système de dégagement de chaleur. Par rapport aux solutions avec accumulateur en série présentées à la page 93, plusieurs circulateurs seront nécessaires, un dans le circuit de charge et un dans les circuits de décharge (groupes de chauffage). L'accumulateur technique assure le respect du débit massique minimal de la pompe à chaleur, il joue ainsi le rôle des soupapes de décharge intégrées dans les solutions évoquées auparavant. Pour s'adapter aux besoins de chaleur (p. ex. réglage par pièce du système de dégagement de chaleur), il est conseillé de régler les pompes de décharge dans les groupes de chauffage selon la pression (circulateurs à vitesse de rotation variable).
Si plusieurs groupes de chauffage avec différentes exigences de température (p. ex. radiateurs et chauffages au sol) sont raccordés côté consommateur – tel qu'illustré sur le schéma –, le groupe ayant les exigences de température les plus basses a besoin d'un réglage séparé (représentation sur le schéma: Branchement en mélange). Le groupe ayant les températures de départ les plus élevées est «activé» directement via le régulateur de la pompe à chaleur. Il est également impératif de veiller tout spécialement au raccordement hydraulique de l'accumulateur: le départ primaire (sortie de la pompe à chaleur) est conduit directement aux groupes de chauffage et est raccordé à l'accumulateur par le biais d'une conduite de dérivation, mais ne passe pas à travers l'accumulateur. À basse température de l'accumulateur, un abaissement par mélange de la sortie de la pompe à chaleur est ainsi rendu impossible. La perte de pression de la conduite de dérivation devrait être maintenue la plus faible possible. Le débit massique dans le circuit de charge doit être supérieur à celui des circuits de décharge.

Accumulateur en parallèle, avec production d'eau chaude

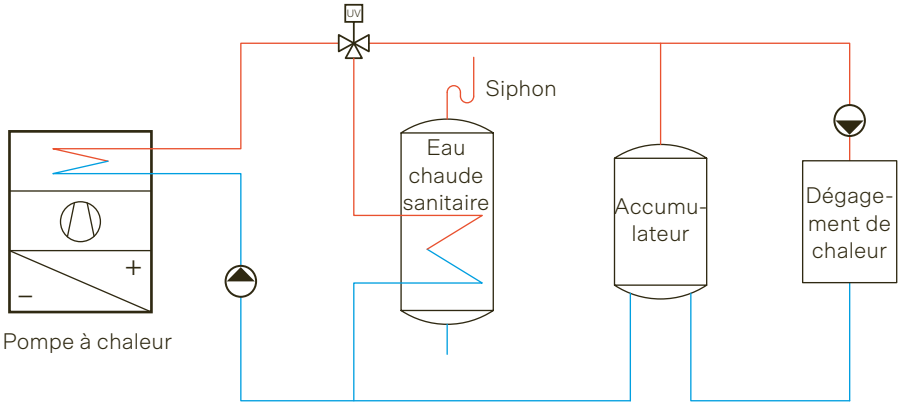


Illustration 13.6: Chauffe-eau, accumulateur d'eau chaude et dégagement de chaleur dans une séquence judicieuse.

Comme pour la solution avec l'accumulateur en série, une production d'eau chaude sanitaire supplémentaire doit être intégrée avant l'accumulateur d'eau chaude. Dans le cas contraire, à chaque charge d'eau chaude sanitaire, l'accumulateur serait alors également chargé avec des températures inutilement élevées (à des fins de chauffage). Dans le cas des pompes à chaleur à circulateurs intégrés, elles doivent s'adapter au reste du système hydraulique. Un faux débit massique peut accroître l'augmentation de la température dans la pompe à chaleur et ainsi réduire l'efficacité: par exemple, une hausse de la température de 2 K diminue l'efficacité de 3 %.

Accumulateur en parallèle, avec appoint solaire pour la production d'eau chaude

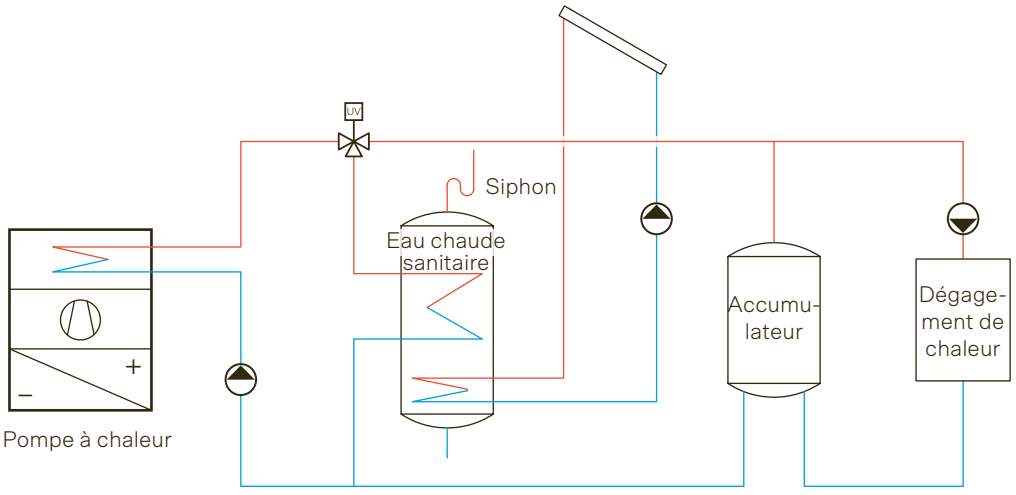


Illustration 13.7: Il faut être prudent lors de l'intégration de la chaleur solaire thermique.

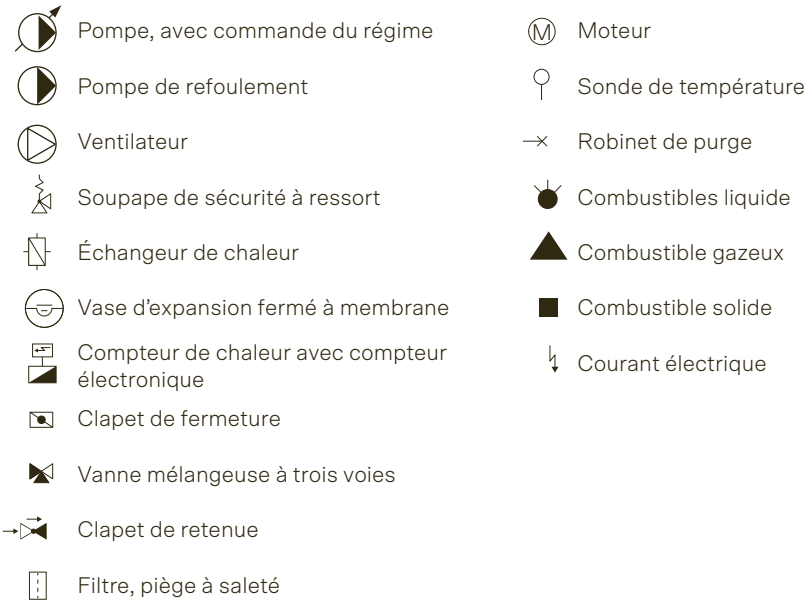
Le fonctionnement avec une pompe à chaleur pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, y compris un appoint solaire thermique, est déjà une solution exigeante qui nécessite une planification appropriée. La production d'eau chaude sanitaire avec énergie solaire doit être garantie. Par conséquent, le registre de chauffage du circuit solaire dans l'accumulateur d'eau chaude doit être inférieur au registre de chauffage de la pompe à chaleur. La surface de ce dernier doit s'adapter à la pompe à chaleur, c'est-à-dire qu'elle doit être suffisamment grande. De même, la régulation des deux sources de chaleur doit être coordonnée (priorité pour l'installation solaire).

13.2 Installations plus complexes

Cette section présente quelques exemples d'installations généralement plus grandes et plus complexes. Il faut veiller à ce que les installations complexes fassent l'objet d'une planification particulièrement soignée. Ces installations ne sont pas ordinaires sur le plan de la technique de régulation. De ce fait et outre les raisons financières, elles ne sont destinées qu'à des bâtiments ayant des besoins en chaleur et en froid très importants.

Exemple	Page
Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques	147
Installation de pompe à chaleur d'eau souterraine avec chaudière à mazout	148
Exploitation de la chaleur des eaux usées pour le chauffage de l'eau potable	149
Installation de pompe à chaleur air-eau combinée avec une chaudière à bûches	150
Pompe à chaleur à sondes géothermiques combinée avec une machine frigorifique et une chaudière	151
Production d'ECS au moyen de stations d'eau fraîche	153

Symboles



Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques

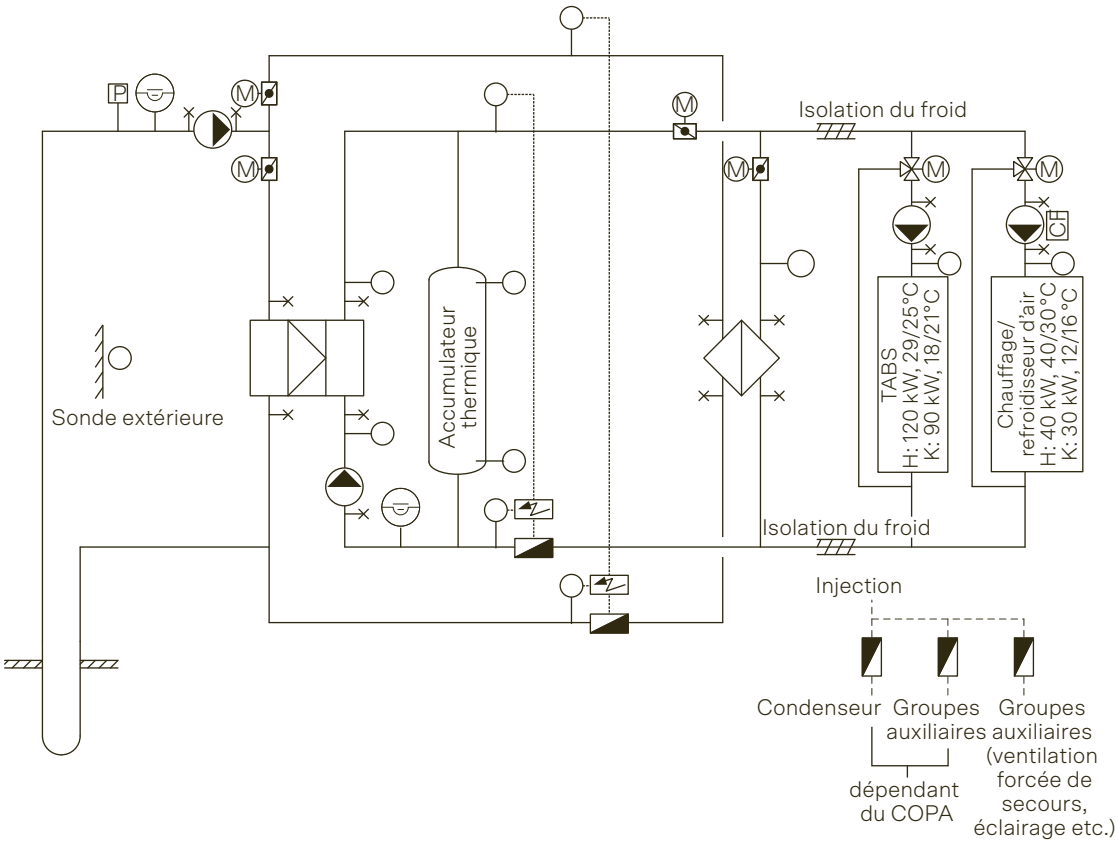


Illustration 13.8: Sonde géothermique, pompe à chaleur et TABS pour la chaleur ambiante, sans pompe à chaleur pour le refroidissement.

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 séparément de la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement
- Dimensionnement des refroidisseurs et réchauffeurs d'air
- Isolation du réseau de rafraîchissement afin d'éviter la 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

Installation de pompe à chaleur d'eau souterraine avec chaudière à mazout

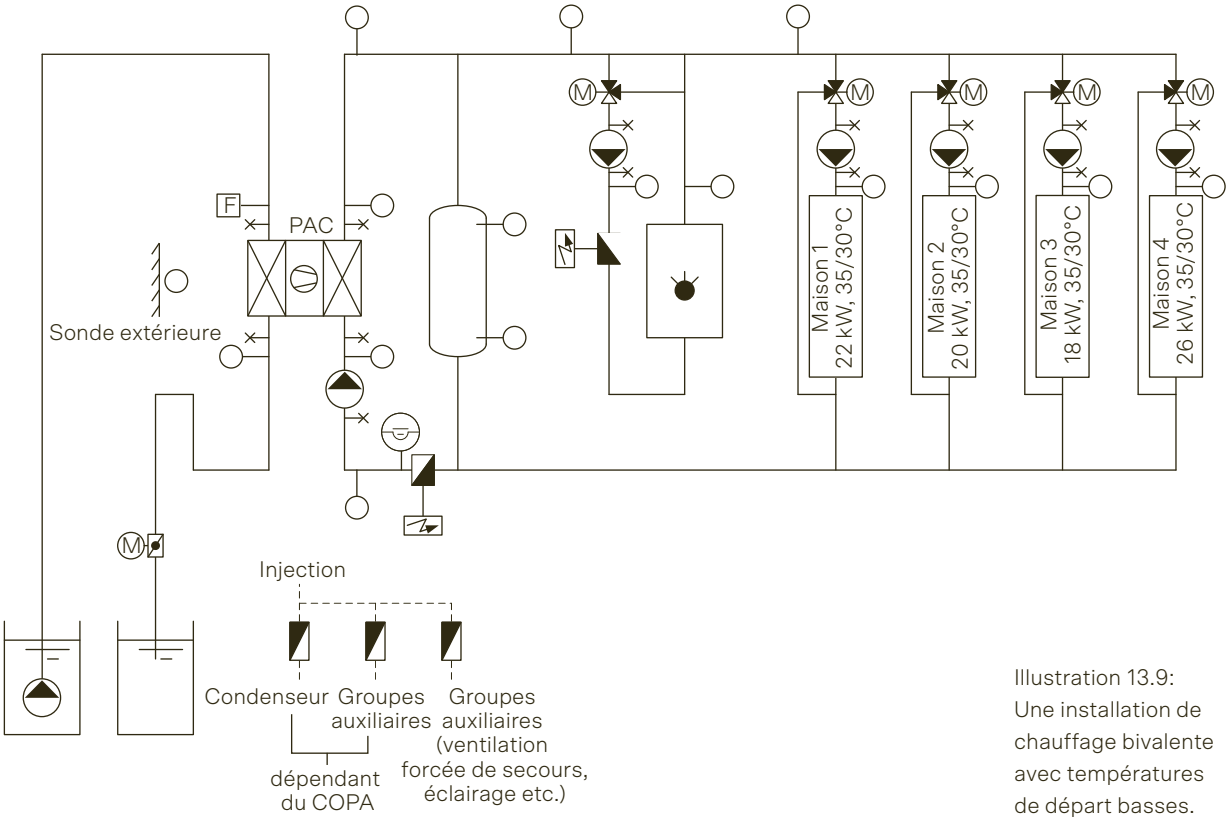


Illustration 13.9:
Une installation de chauffage bivalente avec températures de départ basses.

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 bivalent parallèle). 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 souterraine en ce qui concerne les paramètres physiques et chimiques ainsi que les matières solides etc.
- Dimensionnement du circulateur de l'eau souterraine

Exploitation de la chaleur des eaux usées pour le chauffage de l'eau potable

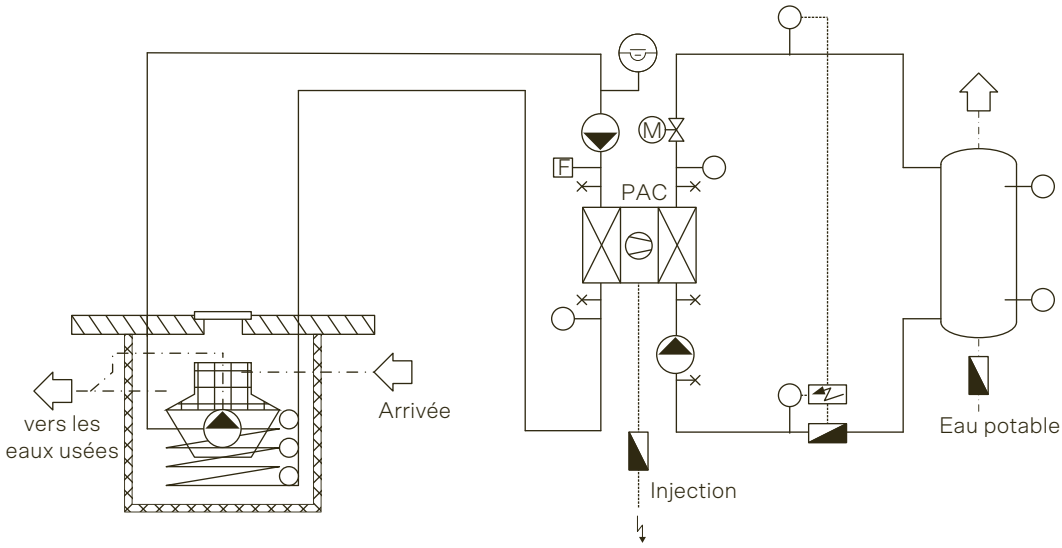


Illustration 13.10: Chaleur provenant des eaux usées comme source pour la pompe à chaleur.

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

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

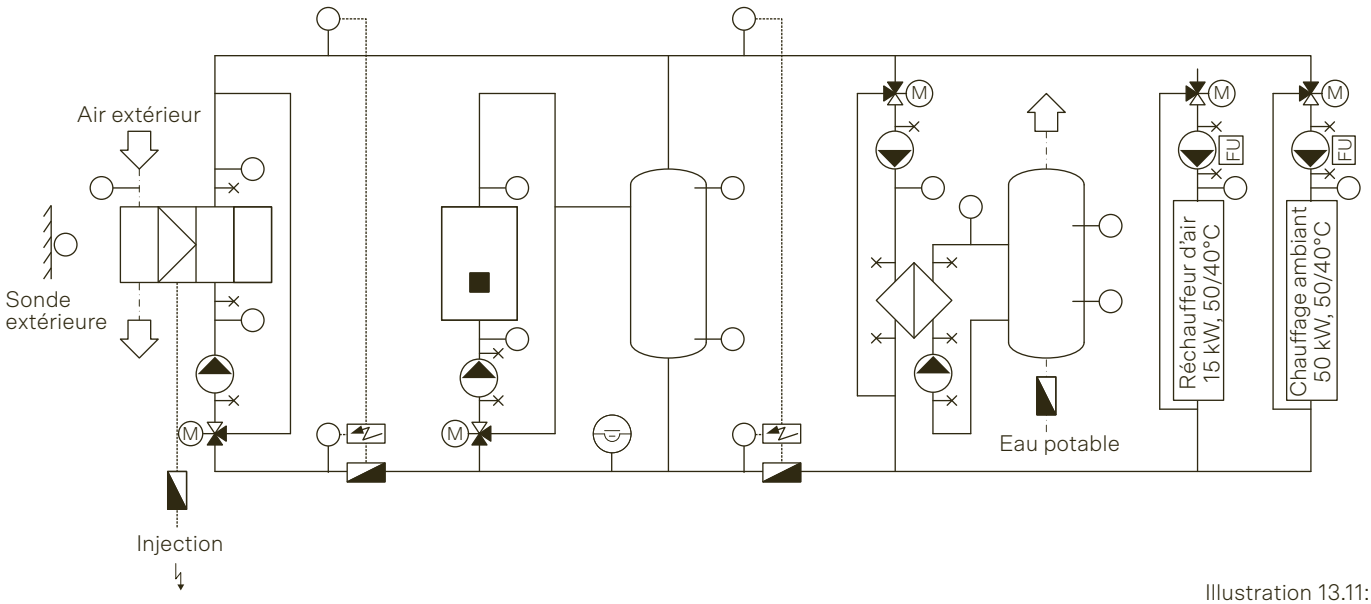


Illustration 13.11: Chauffage bivalent avec énergies renouvelables.

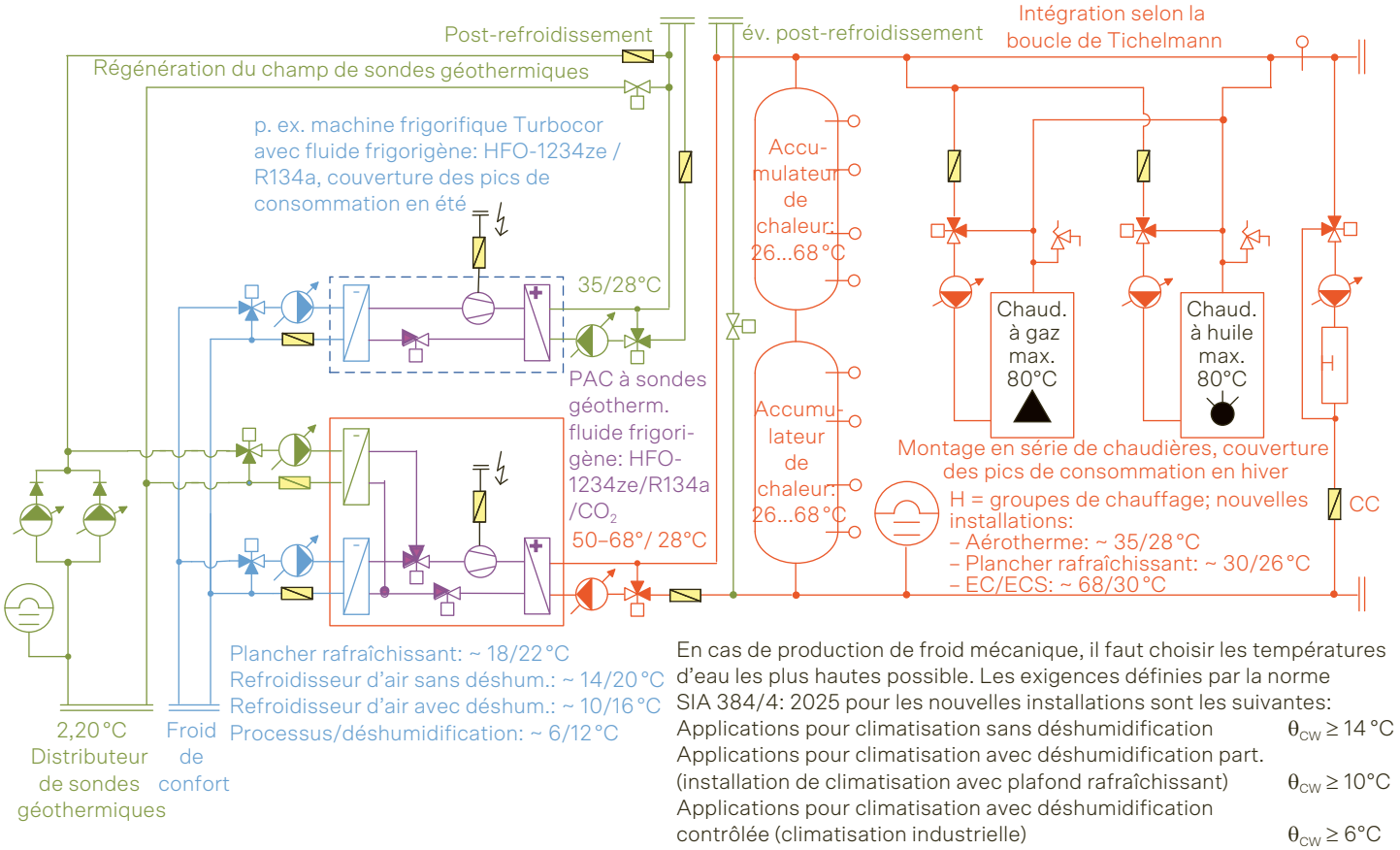
Objet: École d'agriculture

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
- Émissions sonores et autres

Pompe à chaleur à sondes géothermiques combinée avec une machine frigorifique et une chaudière



En cas de production de froid mécanique, il faut choisir les températures d'eau les plus hautes possible. Les exigences définies par la norme SIA 384/4: 2025 pour les nouvelles installations sont les suivantes:

Applications pour climatisation sans déshumidification	$\theta_{cw} \geq 14$ °C
Applications pour climatisation avec déshumidification part. (installation de climatisation avec plafond rafraîchissant)	$\theta_{cw} \geq 10$°C
Applications pour climatisation avec déshumidification contrôlée (climatisation industrielle)	$\theta_{cw} \geq 6$°C

Illustration 13.12: Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques combinée avec une machine frigorifique et une chaudière. La pompe à chaleur fournit 40 % de la puissance de chauffage maximale [kW] et couvre environ 80 % des besoins en chaleur [kWh] d'un grand bâtiment.

Objets typiques: centres pour personnes âgées, centres de soins, hôtels, cliniques ou hôpitaux

Chauffage au cours du semestre d'hiver: La pompe à chaleur (PAC) à sondes géothermiques est dimensionnée à une valeur proche des 40 % des besoins en puissance thermique et elle produit la chaleur destinée à couvrir la charge de base du bâtiment. Une part comprise entre 60 % et 80 % environ des besoins annuels en énergie est couverte par cette PAC, eau chaude sanitaire (ECS) comprise. Les deux chaudières ne se mettent en route que lorsque les températures extérieures sont très basses (moins de 0 °C).

Refroidissement au cours du semestre d'été: La PAC à sondes géothermiques permet de produire également le froid de confort (climatisation) en même temps que la chaleur. En outre, les besoins en refroidissement peuvent être directement couverts par le champ de sondes géothermiques pendant la période de transition. Autrement dit, l'utilisation des compresseurs n'est pas nécessaire. La machine frigorifique pour pic de charge n'intervient que lorsque les températures extérieures sont très élevées (plus de 28 °C) et que les accumulateurs de chaleur sont remplis. Elle assure une production de froid à haute efficacité énergétique. En effet, ses rejets thermiques ne sont pas éliminés via le post-refroidissement et sont utilisés pour régénérer le champ de sondes géothermiques.

Points clés

Pompe à chaleur à sondes géothermiques pour la production simultanée

de chaleur et de froid. Le réseau de froid et les sondes géothermiques (ou les eaux souterraines) constituent respectivement la première et la deuxième source de chaleur. Fluides frigorigènes:
- R744 (CO_2), utilisation recommandée dans le cas d'un écart de température important tel que celui d'une production d'eau chaude dont la température passerait de 10 à 65 °C
- R717 (NH_3), utilisation généralement recommandée, cependant les investissements, les exigences de sécurité et les frais de service sont élevés
- HFO-1234ze, utilisation recommandée pour remplacer le fluide frigorigène R134a, peut également être utilisé en tant que fluide frigorigène pour les compresseurs Turbocor à COP élevé, en particulier dans la plage de charge partielle.

Refroidissement de base (ou refroidissement direct) à l'aide des sondes géothermiques via le chauffage au sol (changeover), via des refroidisseurs à air pulsé dans les salles de serveur et d'informatique et via le post-refroidissement du froid commercial.

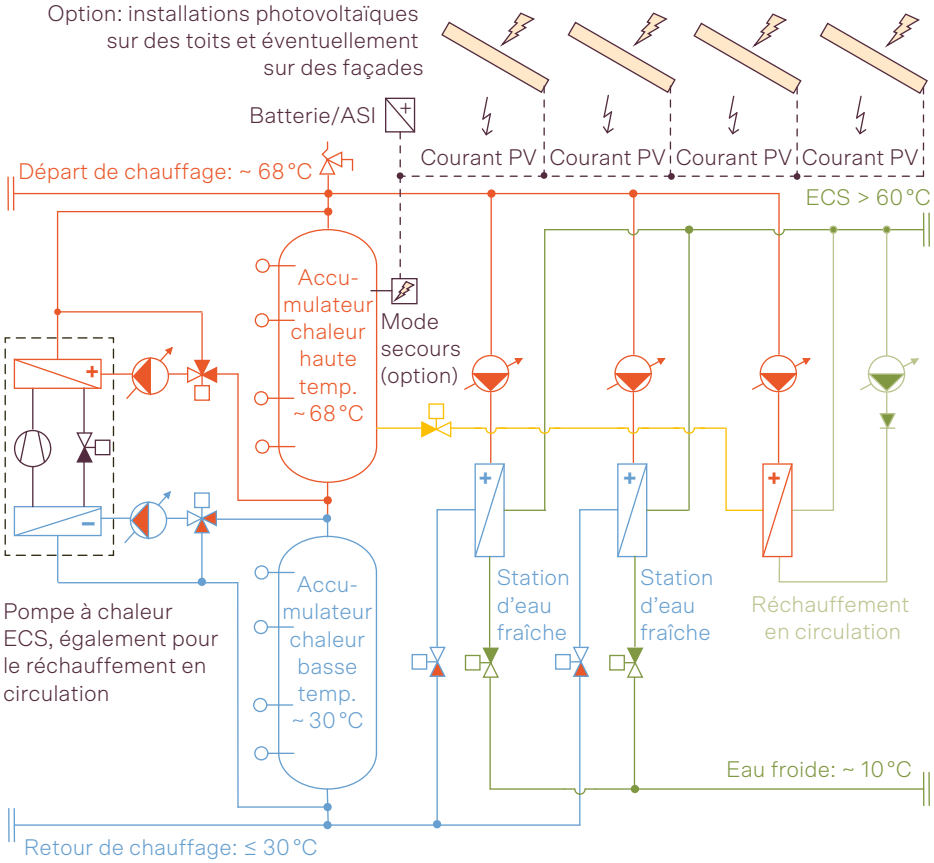
Machine frigorifique Turbocor pour couvrir les pics de consommation de froid pendant les mois d'été, avec de hauts rendements à charge partielle (COP > 10). Le fluide frigorigène R134a peut être utilisé à des puissances frigorifiques allant jusqu'à 400 kW. Si des puissances supérieures sont requises, il est alors nécessaire de recourir à des fluides frigorigènes naturels ou au HFO-1234ze. La «ventilation tempête» doit être dimensionnée avec soin et avec une aspiration directe à proximité du sol.

Marche à suivre en cas d'installations de pompe à chaleur d'une puissance supérieure à 400 kW: détermination des éléments suivants:
1. le groupe de sécurité du fluide frigorigène
2. la zone d'installation dans le bâtiment
3. la catégorie de l'installation
4. la mise en place de l'installation. Doit-elle être posée de façon apparente ou doit-elle être «enfermée» dans une enveloppe ventilée mécaniquement? Si l'installation est posée de manière hermétique, il serait alors possible de réduire les mesures de sécurité dans le local technique. Toutes les informations importantes consacrées à cette question sont fournies par le «Guide des fluides frigorigènes» de SuisseEnergie.

Installations de chaudière neuves ou existantes (pétrole, gaz, bois) intégrées en série à la pompe à chaleur et, dans l'idéal, selon la boucle de Tichelmann. Le retour principal de tous les groupes de chauffage est toujours préchauffé dans un premier temps par la pompe à chaleur, puis réchauffé par les chaudières en cas de températures extérieures très basses.

Points importants à prendre en compte
- Intégration du froid commercial avec refroidissement direct à sondes géothermiques (ou post-refroidissement) des condenseurs
- Optimisation de l'efficacité énergétique grâce à une utilisation maximale des rejets thermiques
- Choix minutieux des fluides frigorigènes et des compresseurs
- Analyse et optimisation des fonctionnements à charge partielle tant en hiver qu'en été
- Prise en compte des températures maximales et minimales pour le chauffage et le froid selon la norme SIA 382/1:2025 «Ventilation mécanique dans les bâtiments – Bases et exigences»

Production d'ECS au moyen de stations d'eau fraîche



Objets typiques: toutes les applications qui requièrent de l'eau chaude sanitaire (ECS)

Production d'ECS au cours du semestre d'hiver: L'ECS est produite en premier lieu par un générateur de chaleur centralisé et notamment par une pompe à chaleur à sondes géothermiques. Plusieurs pompes à chaleur décentralisées sont installées pour assurer le réchauffement en circulation et l'obtention d'une basse température de retour (≤ 30 °C). Elles refroidissent le premier accumulateur de chauffage à une température de 30 °C pendant que le deuxième accumulateur est chauffé à une température comprise entre 62 et 70 °C environ. Ce processus génère un écart de température important entre le départ et le retour et permet donc d'obtenir une efficacité énergétique élevée.

Production d'ECS au cours du semestre d'été: La pompe à chaleur (ou un chauffe-eau pompe à chaleur) ou une pompe à chaleur «exergie» permet de produire l'ECS d'une manière décentralisée et de couvrir les pertes de circulation. Les sources de chaleur peuvent être, par exemple, les suivantes: l'air extérieur, les rejets thermiques d'installations frigorifiques dans l'accumulateur de chauffage à basse température, etc. Ainsi, les pertes de circulation demeurent à un faible niveau, car les conduites de raccordement entre la centrale de chauffage et la production d'ECS décentralisée ne doivent pas être chauffées.

Points clés

Sécurité: La pompe à chaleur décentralisée supplémentaire accroît la sécurité de fonctionnement de la production d'ECS.

Hygiène: installation d'accumulateurs de chauffage pour la conservation d'énergie. Ainsi, la présence d'accumulateurs n'est pas nécessaire du côté de l'installation sanitaire. L'ECS est alors produite uniquement si sa production est indispensable (via un chauffe-eau instantané). S'agissant du détartrage et de la lutte contre la formation de légionelles, le contrôle et le nettoyage des stations d'eau fraîche sont les seules opérations à effectuer. Une interruption de la production d'ECS n'est pas nécessaire afin d'exécuter ces tâches. Une telle solution requiert au moins deux échangeurs de chaleur et un échangeur de chaleur supplémentaire pour le réchauffement en circulation.

Photovoltaïque: Dans le cas d'une défaillance totale de la production de chaleur, l'ECS peut être directement produite dans l'accumulateur à haute température. Pour ce faire, il convient de prévoir un corps de chauffe électrique à l'intérieur de cet accumulateur.

Efficacité énergétique: Ce système permet de maximiser l'efficacité énergétique. Il se distingue par les caractéristiques suivantes:
- un écart de température important entre le départ de chauffage et le retour et des pertes de pompage minimales
- une température de retour la plus basse possible et un rendement élevé du générateur de chaleur
- des pertes de circulation minimales au cours du semestre d'été grâce à une production d'ECS décentralisée

Annexe

14.1 Auteurs

Auteurs de la révision globale 2025

- Andreas Genkinger, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz (coordination globale)
- Prof. Dr. Zoran Alimpic, Haute école de Lucerne – Technique et architecture, Horw
- Christoph Messmer, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz
- Lorenzo Zgraggen, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz
- David Zogg, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz

Auteurs de la édition 2018

- Ralf Dott, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz (coordination globale)
- Prof. Dr. Thomas Afjei, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz
- Prof. Dr. Zoran Alimpic, Haute école de Lucerne – Technique et architecture, Horw
- Andreas Genkinger, Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, Institut Énergie dans la construction, Muttenz
- Peter Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg
- Rita Kobler, Office fédéral de l'énergie, Section Énergies renouvelables

14.2 Abréviations

AEAI	Association des établissements cantonaux d'assurance incendie
ASF	Association Suisse du Froid
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASIT	Association suisse d'inspection technique
AWN	Utilisation des rejets thermiques
BMA	Système d'alarme incendie
BO	Optimisation de l'exploitation
BOk	Optimisation de l'exploitation d'installations techniques complexes
BWP	Association fédérale allemande des pompes à chaleur
CF	Convertisseur de fréquence
CFC	Catégorie de fluide frigorigène: hydrochlorofluorocarbures entièrement halogénés
CFST	Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail
COP	Coefficient of Performance, Coefficient de performance
COPA	Performance annuel pour les pompes à chaleur
CVCR	Chauffage, ventilation, climatisation, refroidissement
DS	Degré de sensibilité en matière de la protection contre le bruit
EBF	Surface de référence énergétique
eBO	Optimisation énergétique de l'exploitation
ECS	Eau chaude sanitaire
EEI	Indice de performance énergétique
EER	Energy Efficiency Ratio, valeurs caractéristiques d'une pompe à chaleur en mode refroidissement
EFH	Maisons familiales
EHPA	European Heat Pump Association, Association Européenne des Pompes à Chaleur
EID	External Interface Descriptions
EMS	Système de management de l'énergie
Epa	Environmental Protection Agency, Agence américaine de protection de l'environnement
EPDP	Energy Performance of Buildings Directive de l'UE, Directive UE relative à la performance énergétique des bâtiments
EPI	Équipement de protection individuelle
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio, Coefficient de performance européen en charge partielle
ESTI	Inspection fédérale des installations à courant fort
ETS2	Emissions Trading System, Système d'échange de quotas d'émission de l'UE
EU-ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation, Règlement sur l'écoconception des produits durables
EVU	Entreprise de distribution d'énergie
EWS	Sondes géothermiques
FM	Facility Management
GA	Automatisation des bâtiments
GSP	Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur
GWA	Technologies d'extinction gaz, eau, eaux usées et incendie
GWP	Global Warming Potential, potentiel à effet de serre
HCFC	Catégorie de fluide frigorigène: hydrochlorofluorocarbures partiellement halogénés

HCFO	Catégorie de fluide frigorigène: Oléfines hydrochlorofluorocarbures, hydrocarbures partiellement halogénés
HFC	→ PFC
HFO	Catégorie de fluide frigorigène: Oléfines hydrofluorés
ICS	ImmoClimat Suisse
KEPZ	Augmentation prévue du coût de l'énergie
LAN	Local Area Network, Réseau local
LCCP	Life Cycle Climate Performance, Impact du climat tout au long du cycle de vie
MFH	Immeuble
MoPEC	Modèle de prescriptions énergétiques des cantons
MSRL	Mesure, commande, régulation
ODP	Ozone Depletion Potential, destructeur de l'ozone
OEEE	Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OIBT	Ordonnance sur les installations à basse tension
OPB	Ordonnance sur la protection contre le bruit
ORRChim	Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques
PAC-SM	PAC Système-Module, standard
pbFM	Facility Management adapté à la planification
PFAS	Substances per- et polyfluoroalkylées
PFC	Catégorie de fluide frigorigène: hydrocarbures fluorés partiellement halogénés
PV	Photovoltaïque
RC	Récupération de la chaleur
RWA	Systèmes d'évacuation des fumées et de la chaleur
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance, → COP, pondéré selon la saison
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio, → EER, pondéré selon la saison
SICC	Société suisse des ingénieurs de technique du bâtiment, avant: Société suisse des ingénieurs de chauffage et de climatisation
SNG	Niveau d'utilisation du système
Suva	Assurance-accidents suisse
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol, protocole de réseau
TEWI	Total Equivalent Warming Impact, contribution totale au réchauffement équivalent
TFA	Acide trifluoroacétique
TWL	Niveau de température thermistance, pour les réseaux de chaleur
WNG	Taux d'utilisation du générateur de chaleur
WPZ	Centre de test des pompes à chaleur

14.3 Index

A
Accumulateur combiné 81
Acoustique 97
Aides à l'étude du projet 104
Anergie 5
Applications industrielles 136
Approvisionnement en électricité 105

B
Bases légales 12
By-pass gaz chauds 23

C
Capacité thermique des bâtiments et des accumulateurs 86
Changement climatique 58
Chargement étagé 80
Chargement par stratification 80
Chauffage à air 69
Chauffage à eau chaude 66
Chauffage au sol 65, 66
Chauffage par radiateurs 68
Chauffe-eau à pompe à chaleur 73
Circulateurs 83
Coefficients de performance annuels, valeurs indicatives 109
Comparaison des offres de pompes à chaleur 107
Composants 17
Compresseur 17
Contrôle des résultats 109, 123
Contrôle d'étanchéité 123
COP 8
Cycle de carnot 6

D
Découplage thermique à bonne température 71
Définitions
  Énergies 8
  Puissances 8
Dégagement de chaleur 65
Dégivrage naturel 24
Détendeur 21
Diagramme log p,h 6
Dispositifs de dégivrage 23
Dispositifs de mesure 111
Dispositifs de sécurité 22
Documentation relative à l'installation 121
Dysfonctionnement et réparation des pannes 127

E
Eau souterraine 49
Échangeur de chaleur 19
Ecodesign 12
EER 62
EER (Energy Efficency Ratio) 11
Efficience de l'énergie primaire 11
Énergie interne 5
Energy Efficency Ratio 62
Enthalpie 5
Entropie 5
ESEER (European Seasonal Energy Efficency Ratio) 11
Etiquette-energie 12
Exemples concrets 141
  Installations de petite taille 141
  Installations plus complexes 146
Exergie 5
Exploitation 123
Exploitation de la chaleur des eaux usées pour le chauffage de l'eau potable 149

F
Fluide frigorigène 25
  Catégories 28
  Choix 27
  Concepts de sécurité 29
  Conditions-cadres légales 36
  Désignation selon l'ASHRAE 27
  Effet de serre 34
  Naturel 29
  Potentiel de déplétion ozonique 25
  Puissance frigorifique volumétrique 25
  Quantité de remplissage maximale 33
  TEWI 34
Fonctionnement bivalent 76
Fonctionnement bivalent alternatif 77
Fonctionnement bivalent parallèle ou bivalent partiellement parallèle 77
Fonctionnement monovalent 76
Fonctionnement transcritique 32
Free cooling 60

G
Géothermie 43
  Corbeilles 48
  Parois moulées 48
  Registre 47
  Tranchée 48

I
Installation de pompe à chaleur air-eau 150
Installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques 147
Installation de pompe à chaleur d'eau souterraine 148
Installation et accessibilité 106
Installations de ventilation et de climatisation 64
Instructions de service 118
Intégration dans des systèmes photovoltaïques 85

L
Label de qualité GSP/EHPA 103
LCCP 35
Légionelles 72
Life Cycle Climate Performance 35
Limitation du courant de démarrage 105
Livret d'entretien 123

M
Maintenance 123
Mise en service 115
  Contrôle des dispositifs de mesure et de régulation 116
  Contrôle du montage 116
  Pompe à chaleur 117
  Préparation 116
  Protocole 118
  Source de chaleur et dégagement de chaleur 117
Mise sur le marché 37
Modules d'eau chaude instantanée 79

N
Normes 10

O
Optimisation de l'exploitation 124

P
PACesti 104
PAC système-module (PAC-SM) 103
PFAS 36
Photovoltaïque
  Intégration de la pompe à chaleur 88
  Interfaces 92
  Modes de fonctionnement d'une pompe à chaleur 89
  Taux de couverture solaire 85
Pieux énergétiques 47
Planification 103
Pompe a chaleur
  Modes d'exploitation 76
Pompe à chaleur pour piscine 74
Pompes à chaleur
  Pour grandes puissances 129
  Pour lotissements 135
Pompes à chaleur à haute température 137
Prélèvement et restitution de l'eau souterraine 51
Production d'eau chaude 70, 153
Protection contre le bruit 97
Puissance 5
Puits filtrants 52

R
Réduction du bruit 98
Refroidissement avec des pompes à chaleur 56
Refroidissement de bâtiments 55
Rejets thermiques 54
Rentabilité 107

S
SCOP 10, 103
Sécurité 106
SEER (Seasonal Energy Efficency Ratio) 11
SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) 62
SmartGridready 95
Sondes géothermiques 43
  Avec technique au CO_2 45
  Pompe à chaleur 151
  Régénération 60
Sources de chaleur 41
Stratégies pour le chargement de l'accumulateur 78
Surveillance de l'exploitation 123
Symboles 146
Système hydraulique 78
  avec refroidissement actif 83
  dans les installations de refroidissement passif 82
Systèmes de chauffage à distance et de chauffage de proximité 136
Systèmes de composants thermoactifs 67
Systèmes de refroidissement 59

T
TEWI 34
TFA 36
Types de pompes à chaleur 24

U
Utilisation efficace des matériaux et des ressources 16

V
Valeurs caractéristiques pompe à chaleur 8
Valeurs de référence 110