

Brunner | Kriegers | Prochaska | Tillenkamp

# Froid de confort – aujourd'hui

Solutions intelligentes pour un  
climat intérieur agréable



**DIE PLANER.**  
RÉSEAU POUR L'ÉNERGIE, L'ENVIRONNEMENT



## Aperçu 1

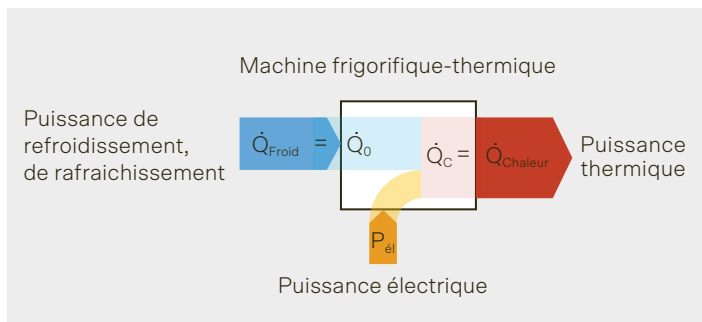
# Définitions et abréviations

Les domaines du chauffage et de la climatisation ont des racines historiquement différentes, ce qui se reflète également dans les symboles utilisés. Dans cet ouvrage spécialisé, nous avons convenu des symboles suivants.

### Symboles de formule sélectionnés

T	Température en °C (degrés Celsius) ou K (Kelvin)
$\Delta T$	Différence de température
$T_0$	Température d'évaporation
$T_C$	Température de condensation
h	Enthalpie spécifique (contenu d'énergie)
w	Travail spécifique
q	Quantité de chaleur spécifique
p	Pression
Q	Chaleur
$\dot{Q}_{\text{Froid}}$	Puissance thermique, flux thermique ( $\dot{Q} = \Phi$ )
$\dot{Q}_{\text{Froid}}$	Puissance de rafraîchissement, de refroidissement, d'évaporation ( $\dot{Q}_{\text{Froid}} = \dot{Q}_0$ )
$\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$	Puissance thermique, de condensation ( $\dot{Q}_{\text{Chaleur}} = \dot{Q}_C$ )
$P_{\text{él}}$	Puissance électrique
$\varepsilon$	Coefficient de performance
$\text{COP}_{\text{Froid}}$	Coefficient de performance machine frigorifique ( $\text{COP}_{\text{Froid}} = \text{EER}$ )
$\text{COP}_{\text{Chaleur}}$	Coefficient de performance pompe à chaleur ( $\text{COP}_{\text{Chaleur}} = \text{COP}_{\text{PAC}}$ )
R	Régulateur (dans les schémas)

### Les flux thermiques



### Abréviations fréquentes

MF	Machine frigorifique
PAC	Pompe à chaleur
MFT	Machine frigorifique-thermique
GTB	Gestion technique du bâtiment
COP	Coefficient de performance
ERR	Ratio d'efficacité énergétique
SEER	Ratio d'efficacité énergétique saisonnier
ESEER	Ratio d'efficacité énergétique saisonnier européen
ETV	Facteur de gain électrothermique
CF	Convertisseur de fréquence
ORRChim	Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques
PRG	Potentiel de réchauffement climatique

### Simplification du calcul du COP et de l'EER

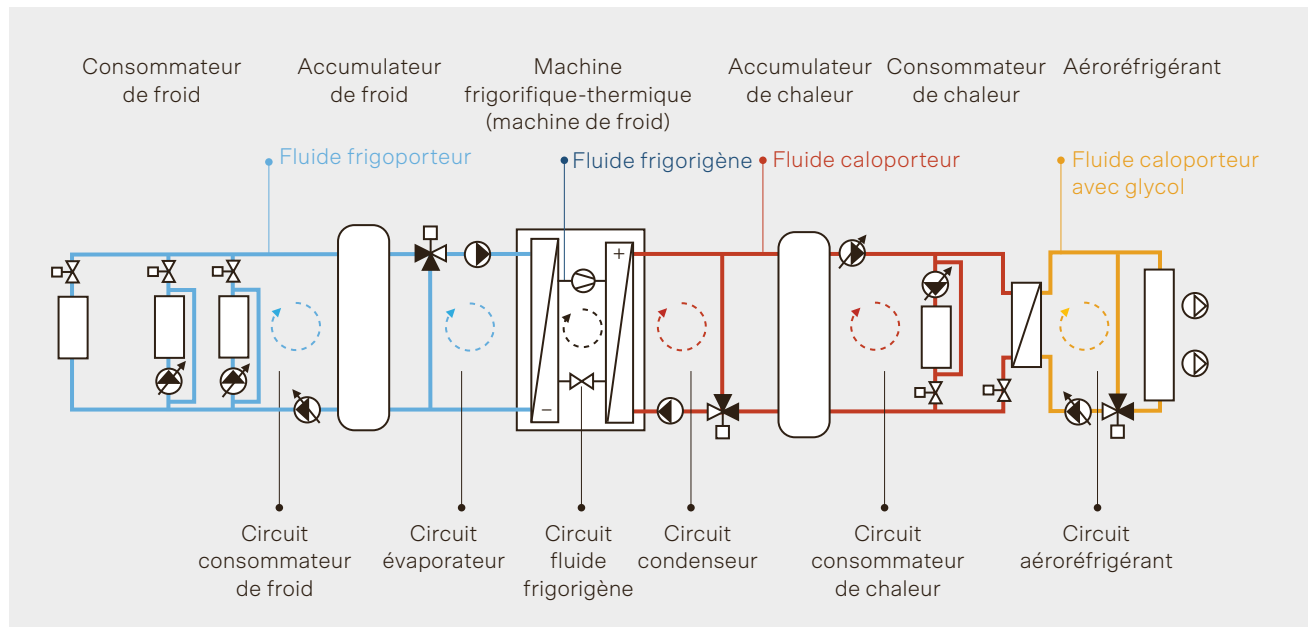
L'ouvrage spécialisé «Froid de confort – aujourd'hui» se veut pratique. Pour cette raison, la définition du COP s'écarte légèrement de la norme. Dans la norme, une part de la puissance des pompes de circulation du condenseur et de l'évaporateur est incluse dans le calcul du COP. En outre, la consommation électrique pour la commande est également comprise. Étant donné que ces trois valeurs ne sont souvent pas disponibles dans la pratique, elles ne sont pas prises en compte dans le présent ouvrage. Le COP calculé de cette manière est de 5 à 10 % supérieur au COP selon la norme (SN-EN 14511). Il en va de même pour la détermination de l'EER.

### Le $\text{COP}_{\text{Froid}}$ et le $\text{COP}_{\text{Chaleur}}$

$$\text{COP}_{\text{Froid}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Froid}}}{P_{\text{él}}}$$

$$\text{COP}_{\text{Chaleur}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Chaleur}}}{P_{\text{él}}}$$

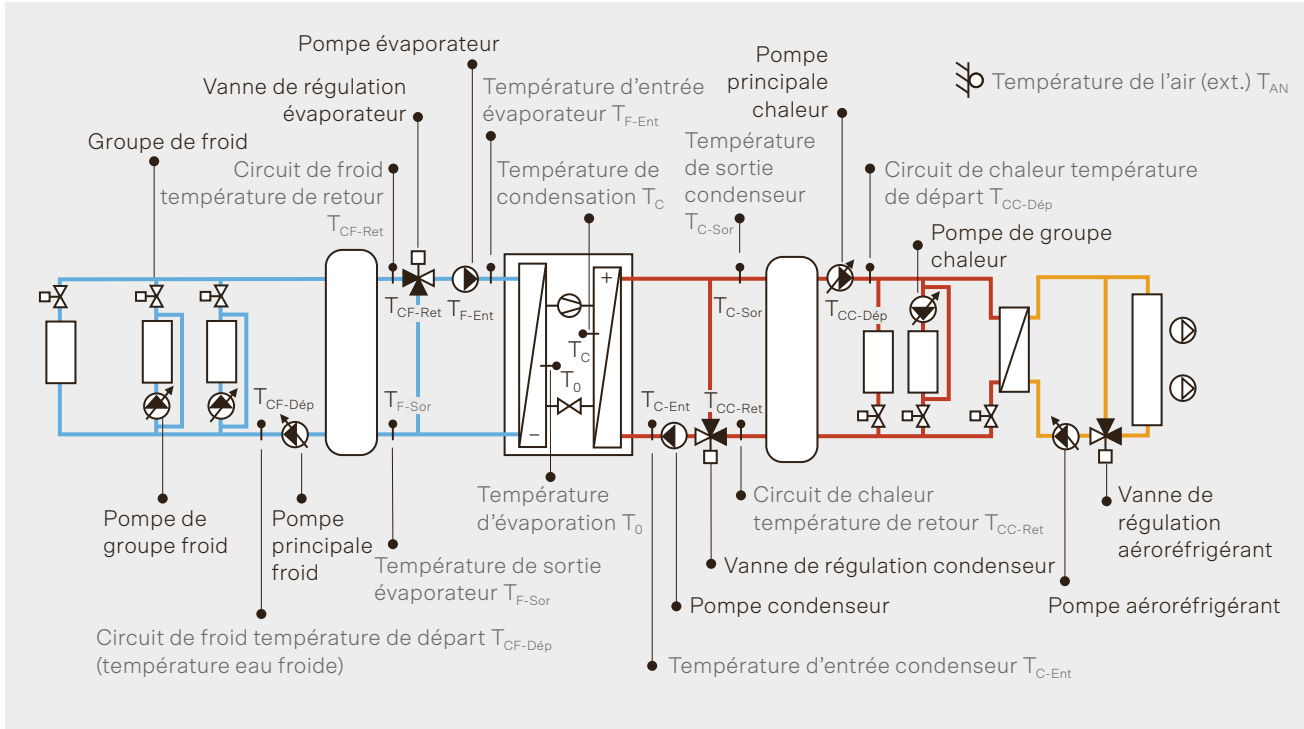
# Fluides et circuits



## Couleur des conduites

- Fluide frigoporteur
- Fluide frigorigène
- Fluide caloporteur
- Fluide caloporteur avec glycol
- Eau chaude sanitaire
- - - - - Électrique (signal, commande)

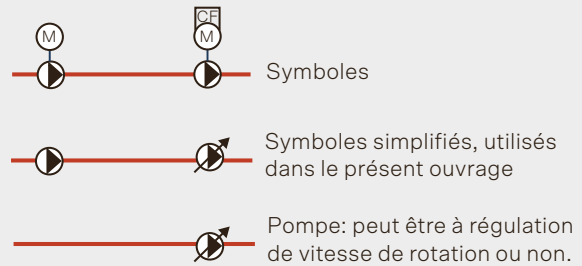
# Composants et sondes de température



## Symboles des pompes, compresseurs et ventilateurs

Les pompes, compresseurs et ventilateurs sont constitués d'une partie mécanique (vis, piston, pales de rotor) et d'une partie électrique (moteur électrique). Dans le présent ouvrage «Froid de confort – aujourd'hui», pour des raisons didactiques et de simplification, les deux parties sont généralement représentées comme un seul élément.

### Pompe avec moteur    Pompe avec moteur et CF





# Contenu

<b>1. Voyage dans le temps à travers la climatisation</b>	<b>7</b>	5.3 Comportement du compresseur	66
		5.4 Types de construction des compresseurs	68
<b>2. Aperçu du système global</b>	<b>11</b>	5.5 Généralités sur les échangeurs de chaleur	70
2.1 La pensée systémique pour les systèmes de climatisation	11	5.6 Évaporateur	73
2.2 Les quatre systèmes	12	5.7 Condenseur	76
2.3 Vue d'ensemble du système	13	5.8 Détendeur	79
2.4 Principe de transfert de l'énergie	14	5.9 Autres composants	80
2.5 Considérations conceptuelles	14	5.10 Conception du système en fonction du type d'évaporateur	82
2.6 Tendances en matière de froid de confort	17		
<b>3. Bases</b>	<b>19</b>	<b>6. Absorption de chaleur</b>	<b>87</b>
3.1 Processus du froid	19	6.1 Considérations conceptuelles	87
3.2 Le diagramme log p,h	22	6.2 Systèmes d'absorption de chaleur	89
3.3 Le cycle de Carnot comme comparaison idéale	24	6.3 Aperçu des systèmes de refroidissement	93
3.4 Utiliser le changement d'état	25	6.4 Intégration hydraulique	94
3.5 Flux d'énergie dans la machine frigorifique	26	6.5 Systèmes de refroidissement alternatifs	96
3.6 Sélection des fluides frigorigènes appropriés	30	<b>7. Dégagement de chaleur</b>	<b>99</b>
3.7 Évaluation du TEWI	33	7.1 Considérations conceptuelles	99
3.8 Fluides frigorigènes dans la climatisation	33	7.2 Exploitation directe de la chaleur	106
		7.3 Accumulateur thermique à court terme (jour-nuit)	109
<b>4. Le processus de planification</b>	<b>37</b>	7.4 Stockage saisonnier de la chaleur	110
4.1 Exigences générales	37	7.5 Évacuation directe de la chaleur	111
4.2 Facteurs d'influence	37	7.6 Post-refroidissement: évacuation indirecte de la chaleur	112
4.3 Normes et exigences	45	<b>8. Systèmes hydrauliques</b>	<b>121</b>
4.4 Procédure lors de la planification	47	8.1 Généralités	121
4.5 Pierres d'achoppement fréquentes lors de la planification	53	8.2 Éléments du système hydraulique	122
4.6 Exigences posées aux fournisseurs	54	8.3 Intégration de la machine frigorifique	124
4.7 Que faut-il observer lors de la mise en service et de la réception?	56	8.4 Intégration des consommateurs de froid	127
4.8 Maintenance et entretien de l'installation de climatisation	58	8.5 Absorption de chaleur	130
		8.6 Accumulateur d'eau glacée	134
<b>5. Types de construction et composants</b>	<b>63</b>	8.7 Intégration du post-refroidissement	138
5.1 Le circuit frigorifique et ses composants	63	8.8 Free-cooling	140
5.2 Les types de compresseurs et leur fonction	63	8.9 Dégagement de chaleur	143

8.10	Exploitation du froid et de la chaleur en tant que système global	144	11.8	Approfondissement 6: Arbre de décision relatif à la norme EN 378 et au Feuillet technique SUVA 66139	207
8.11	Système de distribution	146	11.9	Approfondissement 7: Fluides frigorigènes – Substitution et contrôle d'étanchéité	208
<b>9.</b>	<b>Commande et régulation</b>	<b>153</b>	11.10	Index des mots-clés	210
9.1	Généralités	153			
9.2	Approches de la définition des interfaces	154			
9.3	Régulation de la puissance de la machine frigorifique	156			
9.4	Régulation du côté évaporateur	157			
9.5	Régulation du côté du condenseur	160			
9.6	Mise en marche et arrêt de la machine frigorifique	162			
9.7	Sécurité des machines frigorifiques	164			
9.8	Vannes de régulation et sondes	167			
9.9	Exemples de combinaison de régulations	169			
9.10	Monitoring de l'exploitation	170			
	<b>Efficacité énergétique et comportement à charge partielle</b>	<b>173</b>			
10.1	Comprendre l'efficacité du système	173			
10.2	Bilan énergétique d'un système de climatisation	174			
10.3	Évaluation énergétique des installations de climatisation	175			
10.4	Fonctionnement efficient des installations de climatisation	180			
<b>10.</b>	<b>Annexe</b>	<b>189</b>			
11.1	Auteurs	189			
11.2	Documentation	190			
11.3	Approfondissement 1: Turbocompresseur	191			
11.4	Approfondissement 2: Dimensionnement et caractéristique des pompes	194			
11.5	Approfondissement 3: Système global	196			
11.6	Approfondissement 4: Interface relative à la gestion technique du bâtiment	204			
11.7	Approfondissement 5: Sous-refroidissement	205			

Cette publication a été financée par l'Office fédéral de l'énergie OFEN/SuisseEnergie et avec la contribution des entreprises engagées suivantes.





## Impressum

**Froid de confort – aujourd’hui**  
**Solutions intelligentes pour un climat**  
**intérieur agréable**

**Éditeur: Die Planer – SWKI,**  
Urtenen-Schönbühl

**Auteurs: Arnold Brunner, Michael**  
**Kriegers, Vladimir Prochaska et Frank**  
**Tillenkamp** (Répertoire des auteurs,  
Annexe 11.1)

**Co-rédaction:** Robert Dumortier,  
Othmar Humm, Rüdiger Külpmann  
Les auteurs sont responsables du  
contenu de cet ouvrage.

**Direction du projet:** Thomas Lang,  
zweiweg gmbh, Zurich

**Lectorat:** Christian Werner,  
zweiweg gmbh, Zurich

**Traduction:** Ilsegret Messerknecht,  
Messerknecht Traductions spécialisées,  
Monthey

**Lectorat:** Marko Premerl,  
b+p engineering Sàrl, Brent

**Mise en page:** Christine Sidler,  
Noemi Bösch, Faktor Journalisten AG,  
Zurich

**Photo de couverture:** 123rf.com

**Novembre 2021**

# Froid de confort moderne – paré pour l’avenir énergétique

**Les bonnes solutions de techniques du bâtiment sont mises en réseau et prennent toujours en compte l’ensemble du système, qu’il s’agisse de bâtiments, de complexes de bâtiments ou de zones entières. Nous considérons donc le froid de confort d’aujourd’hui comme une machine frigorifique-thermique exploitant judicieusement la précieuse chaleur produite lors du refroidissement. Toutefois, ces solutions ne fonctionnent que si elles sont robustes et peuvent être utilisées facilement et correctement dans la vie quotidienne.**

## **Quelle est l’utilité de cet ouvrage?**

Il existe plusieurs ouvrages spécialisés sur le thème du froid. Il manque cependant un manuel abordant le froid de confort en tant que système complet – du local «refroidi» au consommateur de chaleur en passant par la machine frigorifique. Nous considérons cette vue d’ensemble comme une occasion unique pour les systèmes de climatisation de coupler intelligemment, à l’avenir, refroidissement et chauffage. Il est ainsi possible de réduire de manière significative la consommation énergétique globale d’un bâtiment, d’un lotissement ou d’un site.

La construction de systèmes de froid de confort à la fois plus robustes et plus faciles à utiliser est au cœur de nos préoccupations. Dans la pratique, nous observons que, bien que techniquement prometteuses, des solutions complexes sont planifiées et mises en œuvre. Ce qui semble efficace sur le papier ne fait souvent pas ses preuves au quotidien car le système ne peut pas être exploité correctement.

## **À qui est destiné cet ouvrage?**

Notre ouvrage spécialisé se concentre sur les installations de climatisation d’une puissance frigorifique de 20 à

300 kW. Il s’adresse aux planificateurs de bureaux d’études s’occupant de chauffage, de ventilation et de technique du bâtiment. Nous nous adressons également aux spécialistes de bureaux techniques des entreprises d’installation de chauffage et de ventilation.

## **Quelles sont les connaissances préalables requises?**

Afin d’en tirer le meilleur parti, les lecteurs doivent posséder des connaissances de base en technique du bâtiment correspondant à un bon diplôme de formation, notamment sur la tuyauterie, l’hydraulique et les pompes. En outre, il faudrait avoir de solides bases de la théorie de la thermodynamique.

Nous supposons également des connaissances de base des normes les plus importantes. En font partie, la norme SIA 382/1 (2014) Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation.

## **Vision de la machine frigorifique-thermique**

Qu’il s’agisse de la machine frigorifique ou de la pompe à chaleur, les systèmes fusionneront à l’avenir de plus en plus entre eux. L’accent sera mis d’une part sur la chaleur et sur le refroidissement de l’autre – et très souvent sur les deux ensemble. Cet ouvrage spécialisé suit notre vision de ce que nous appelons la machine frigorifique-thermique. Cela permet d’utiliser de manière judicieuse et efficace la chaleur engendrée lors du refroidissement au lieu de la laisser s’échapper inutilement. Nous n’oublions pas qu’il existe de nombreuses applications – notamment dans les centres-villes – avec un excédent de chaleur ne pouvant être exploité. Pour ces situations, nous montrons comment évacuer la chaleur de façon efficiente.

### **La chaleur est précieuse**

Aujourd'hui encore, les planificateurs et les concepteurs qualifient la chaleur extraite des pièces de «chaleur perdue». Nous combattons résolument cette attitude quelque peu irrespectueuse à l'égard de l'énergie thermique avec la machine frigorifique-thermique. En effet, la chaleur issue du processus de refroidissement a une valeur exploitable. C'est pourquoi, dans le présent ouvrage, nous parlerons systématiquement de «chaleur».

### **Ce que ces 10 chapitres vous apprendront**

Cet ouvrage spécialisé commence par un bref voyage dans le temps à travers l'histoire de la climatisation et permet de mieux comprendre les sujets et les défis actuels. Le Chapitre 2 aborde le système global de la climatisation et l'importance centrale de la pensée systémique pour des solutions intelligentes. Le Chapitre Bases traite de certains phénomènes physiques importants impliqués dans le froid de confort. Vous y apprendrez, par exemple, l'importance du diagramme log p,h pour tout spécialiste de la climatisation. Le Chapitre Planification montre les aspects particulièrement importants à prendre en compte lors de la planification d'un système de climatisation. Ensuite, le chapitre consacré à la Production traite du fonctionnement du cœur du système de climatisation, la machine frigorifique. Les chapitres 6 et 7 sont consacrés à la chaleur: comment la chaleur est-elle absorbée dans les pièces, et comment est-elle libérée ou évacuée? Le Chapitre Hydraulique décrit comment les composants du système sont connectés les uns aux autres.

Ensuite, le Chapitre 9 explique les interrelations qui entourent la commande et la régulation du système de climatisation. Le thème de la climatisation est complété par le dernier chapitre sur l'efficacité énergétique et sur le comportement à charge partielle.

### **Travail d'équipe**

Dans cet ouvrage spécialisé, nous avons appliqué notre vision des machines frigorifiques-thermiques en réseau en tant que système global en exploitation. Ainsi, nous avons élaboré le contenu en tant qu'équipe interdisciplinaire d'auteurs – spécialistes des machines, planificateurs, professeurs d'université. Ici aussi, l'ensemble du travail de collaboration est plus que la somme de ses parties individuelles.

### **Remerciements**

Froid de confort – aujourd'hui est le résultat d'une collaboration fructueuse entre différentes personnes et organisations. Nous tenons à remercier la SICC pour le parrainage du projet et SuisseEnergie pour son généreux soutien financier. Les 27 sponsors du secteur privé ont également apporté une contribution financière importante, ce qui a contribué de façon essentielle à la réalisation de ce projet.

Nos remerciements s'adressent également aux co-réviseurs Robert Dumortier, Othmar Humm et Rüdiger Külpmann pour leur regard critique et précieux sur ce travail. Pour le travail d'édition pertinent, nous adressons un grand merci à Faktor Verlag et en particulier à Christine Sidler et à Noemi Bösch. La traduction a été effectuée par Ilseggret Messerknecht, avec le soutien compétent de Marko Premerl. Enfin, nous tenons à remercier Thomas Lang de l'agence Zweiweg pour la gestion du projet et Christian Werner pour son lectorat compétent.

**Arnold Brunner**

**Michael Kriegers**

**Vladimir Prochaska**

**Frank Tillenkamp**

# Voyage dans le temps à travers la climatisation

Différents pionniers ont façonné les débuts de la technologie moderne de la climatisation. Au milieu du 19<sup>e</sup> siècle par exemple, le médecin John Gorrie cherchait des méthodes pour refroidir les chambres de malades. À cette fin, il construisit le prototype d'une machine à air froid fonctionnelle – mais sans succès commercial. Une autre figure influente de l'industrie du froid fut l'industriel Carl von Linde, qui fournit des brasseries dans toute l'Europe avec ses machines frigorifiques à partir de 1880.



En 1902, le jeune ingénieur Willis H. Carrier mit au point, pour une imprimerie, une machine destinée à éliminer l'humidité de l'air. En effet, l'humidité élevée posait des problèmes majeurs aux entreprises industrielles et artisanales dans la chaleur étouffante de New York. Carrier déshumidifia l'air à l'aide d'un ventilateur, d'un chauffage transformé et d'eau froide – il découvrit que l'air était refroidi dans le processus. Son invention fut baptisée «Air Conditioner» (A/C), et la climatisation «moderne» était née.




Depuis ses débuts, la technologie de la climatisation a constamment évolué. De nouveaux fluides frigorigènes sont recherchés en permanence – pour une meilleure sécurité, contre la détérioration de la couche d'ozone et contre le réchauffement de la planète. Le développement des compresseurs et des systèmes de commande a également beaucoup évolué, qu'il s'agisse des dimensions des machines ou de la commande des machines frigorifiques et des pompes en fonction de la demande à l'aide de convertisseurs de fréquence.

Dans le même temps, «l'image de la profession» du technicien en climatisation évolue. Alors qu'à l'origine, la climatisation est clairement du ressort du spécialiste de la ventilation, les sujets du climat intérieur et du refroidissement fusionnent et sont davantage confiés aux spécialistes du chauffage et de la climatisation.

Enfin, le secteur de la climatisation continue de lutter – à tort – contre une mauvaise image. Cela s'explique notamment par les bâtiments entièrement climatisés qui ont vu le jour en Suisse dans les années 1970 et 1980. Ils étaient refroidis à l'air froid et présentaient souvent de graves lacunes – courants d'air, mauvaise qualité de l'air, consommation d'énergie excessive. Entre-temps, les systèmes ont fondamentalement changé et ces lacunes ont disparu. Aujourd'hui, les systèmes modernes de climatisation permettent d'obtenir un climat intérieur agréable avec peu d'énergie et devraient prendre de l'importance à l'avenir, notamment pendant les mois d'été, toujours plus chauds.

La double page suivante montre certaines des pierres angulaires du développement de la climatisation et que la prochaine innovation en matière de technologie de froid ne manquera pas d'arriver.

	1800	1930	1970	1980	
<b>Phase</b>	Faisabilité technique: des pionniers tels que Willis H. Carrier ou Carl von Linde construisent les premières installations frigorifiques	Sécurité des fluides frigorigènes (inflammabilité, toxicité)	Phase d'expansion	Technologie	
<b>Événement</b>	<p>À partir de 1876, les premières brasseries refroidissent avec des machines frigorifiques et non plus dans des caves à glace</p> <p><b>USA:</b> L'humidité élevée dans les États du Sud rend la région difficile à coloniser. Des solutions sont recherchées pour déshumidifier l'air.</p>	<p><b>Années 1930:</b> Le triomphe du réfrigérateur ouvre également la voie à la climatisation.</p> 	 <p><b>Années 1960:</b> Avec la généralisation de la climatisation, le terme «cool» est devenu un terme positif.</p>	<p>Des bâtiments entièrement climatisés apparaissent.</p> <p><b>1972:</b> Le Club de Rome publie le rapport «Les limites de la croissance».</p> <p><b>1973:</b> Première crise du prix du pétrole</p> <p><b>1979:</b> Deuxième crise pétrolière</p>	<p>Les bâtiments entièrement climatisés ont une image négative du moins en Suisse car ils présentent souvent des défauts (courants d'air, mauvaise qualité de l'air, consommation d'énergie élevée).</p> <p><b>1984:</b> Les plafonds rafraîchissants se généralisent progressivement (1<sup>er</sup> séminaire SICC sur ce sujet).</p>
<b>Thème</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 30%; border: 1px solid #ccc; padding: 5px;">Réduire l'humidité de l'air</div> <div style="width: 65%; border: 1px solid #ccc; padding: 5px; text-align: center;">Climatisation (air conditionné)</div> </div>				
<b>Méthode</b>	<b>Refroidissement par soufflage d'air froid dans la pièce (mode recirculation)</b> > L'énergie est évacuée par l'air > Renouvellement d'air: 7 fois; température de l'air 14 °C > Problèmes: air froid, inconfort				
<b>Direction</b>	<b>Planificateur de la ventilation, installateur de la ventilation</b> > Thème: Refroidissement par air via un système de canaux				
<b>Fluide frigorigène</b>	Fluides frigorigènes naturels	CFC			
	Ammoniac, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	R11, R12	Ammoniac		
<b>Machines frigorifiques</b>	Type Puissance frigorifique Poids COP <sub>Froid</sub>	<b>Machines frigorifiques à compression</b> 100 kW 10 500 kg env. 1,5	<b>Machine frigorifique turbo</b> 350 kW 1500 kg env. 3,0		
<b>Lois, protocoles</b>				<p><b>1985:</b> Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone</p> <p><b>1987:</b> Protocole de Montréal (interdiction des CFC)</p> <p><b>1986:</b> Premières lois cantonales sur l'énergie</p> <p><b>1987:</b> Interdiction des CFC</p>	

1990	2000	2010	2020	Note
Environnement – 1. phase: Trou d'ozone	Environnement 2. phase: Réchauffement de la planète et efficacité énergétique			
<p><b>Trou d'ozone:</b> le chlore contenu dans les fluides frigorigènes endommage la couche d'ozone.</p>  <p><b>1994:</b> Premier bâtiment équipé de TABS et refroidi.</p>	<p><b>Réchauffement climatique:</b> certains réfrigérants synthétiques ont un potentiel de gaz à effet de serre (PRG) très élevé.</p> 	<p>L'efficacité énergétique, l'utilisation de la chaleur et l'économie globale sont davantage mises en avant.</p> 		
<b>Climatisation ambiante et contrôle de la température des composants</b>				Comme le terme «climatisation» a aujourd'hui une connotation plutôt négative, on parle désormais de «climatisation ambiante».
<p><b>Refroidissement par eau dans le plafond et refroidissement doux de l'air soufflé</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; L'énergie est évacuée par le système d'eau</li> <li>&gt; Renouvellement d'air 2 fois, temp. de l'air soufflé non inférieure à 18 °C</li> <li>&gt; Avantage: confort</li> </ul>				Aujourd'hui, l'énergie est généralement transportée par un système d'eau plutôt que par la ventilation.
<p><b>Planificateur de la technique du bâtiment Chauffage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Thème: refroidir avec de l'eau via un système de conduites</li> </ul> <p><b>Planificateur de la technique du bâtiment Ventilation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Thème: La ventilation n'a «que» des buts hygiéniques</li> </ul>				Les questions relatives au climat intérieur et à la réfrigération passent de plus en plus de la ventilation aux professionnels du chauffage et de la réfrigération.
	HCFC, HCFO	HFC	HFO	Les fluides frigorigènes synthétiques ont toujours été développés avec de bonnes intentions. Cependant, de nombreux effets secondaires «non désirés» sont apparus par la suite. Seuls les fluides frigorigènes naturels comme l'ammoniac ont fait leurs preuves au fil des ans – malgré leur toxicité et leur caractère explosif.
	R22, R124, R142b	R134a, R404A, R410A	R1234ze, R1234yf	
	Ammoniac	Ammoniac	Ammoniac, CO <sub>2</sub> , Propane	
		<b>Turbo compresseur avec régulation de la vitesse de rotation</b> 300 kW 120 kg jusqu'à 14		Les machines frigorifiques deviennent plus petites, plus puissantes et plus efficaces.
<p><b>1990:</b> Loi sur l'énergie</p> <p><b>1992:</b> Protocole de Kyoto (objectifs contraignants de réduction du CO<sub>2</sub> pour les pays industrialisés)</p> <p><b>1996:</b> Révision des lois cantonales sur l'énergie (p. ex. Zurich)</p>	<p><b>2003:</b> Directive SICC sur le post-refroidissement</p> <p><b>2004:</b> Obligation d'obtenir un permis pour les installations de réfrigération</p> <p><b>2005:</b> entrée en vigueur de l'ORRChim</p>	<p><b>2014:</b> Norme SIA 382/1 (2014) Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation</p> <p><b>2016:</b> SN EN 378 de «Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement»</p> <p><b>2017:</b> Publication de l'OFEV «Aide à l'exécution Installations contenant des fluides frigorigènes».</p>		De plus en plus de lois et d'ordonnances régissent le secteur de la climatisation et de la réfrigération et doivent être prises en compte par le planificateur.



## Aperçu du système global

Aujourd'hui, la climatisation fait bien plus que «simplement» rafraîchir les pièces. Dans un système global, elle couple les fonctions de refroidissement et de chauffage. Cela signifie que la chaleur engendrée par le refroidissement peut être utilisée dans les bâtiments présentant un besoin de chaleur. Grâce aux sondes géothermiques, la chaleur peut également être stockée de manière saisonnière dans le sol. Il en résulte des solutions extrêmement efficaces sur le plan énergétique. Si la chaleur engendrée ne peut être exploitée, elle doit être évacuée aussi efficacement que possible.

### 2.1 La pensée systémique pour les systèmes de climatisation

Aujourd'hui, lors de la conception du refroidissement et du chauffage d'un bâtiment, l'accent est mis sur les fonctions individuelles. Le concepteur est chargé soit de refroidir un bâtiment, soit de le chauffer. On installe souvent un chauffage et une installation de refroidissement. Et dans le meilleur des cas, on veille à ce que les deux systèmes soient conçus pour être aussi efficaces que possible.

Cette manière cloisonnée de penser appartient au passé. Ce qui suit s'applique à la fois aux bâtiments individuels et à des sites entiers: le chauffage et le refroidissement doivent être considérés comme un système global dès la phase de conception. En effet, une machine dite frigorifique-thermique (MFT) (voir Illustr. 2.6) peut être utilisée pour relier directement les deux systèmes. Pour ce faire, on considère la demande totale d'un bâtiment ou d'un site. Où et quand la chaleur issue de la climatisation est-elle créée? Où et quand y a-t-il un consommateur qui en a besoin?

Il en résulte des systèmes intéressants de refroidissement-chauffage qui produisent beaucoup plus d'énergie utile avec une unité d'énergie d'entrée que les systèmes individuels (Illustr. 2.1).

Pour les spécialistes CVC, cela signifie qu'ils doivent toujours envisager une évacuation judicieuse de la chaleur lors de la planification de l'installation frigorifique. Dans le même temps, aucun système de chauffage ne devrait être planifié sans une utilisation intelligente de l'énergie récupérable par le système frigorifique.

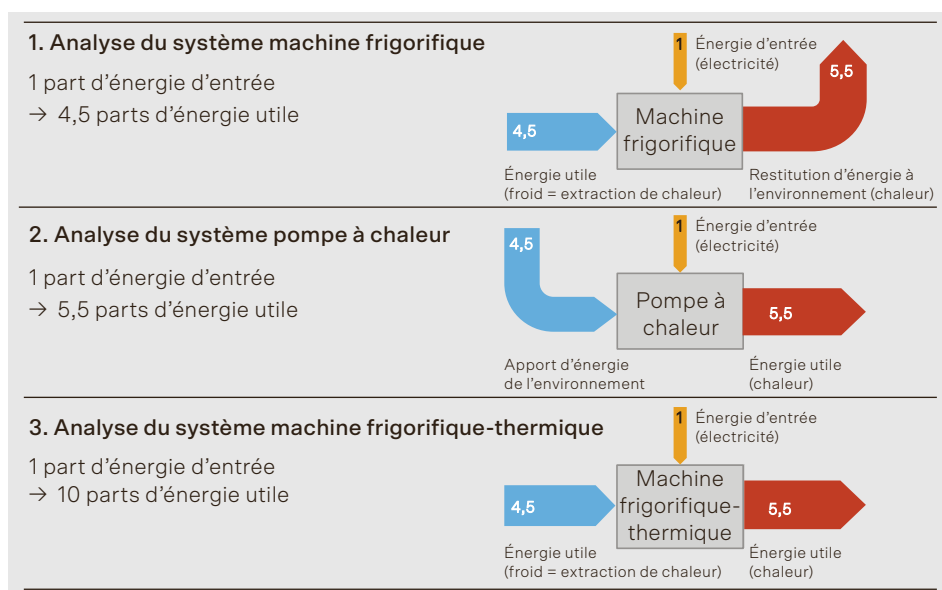


Illustration 2.1: Les analyses du système d'une machine frigorifique, d'une pompe à chaleur et d'une machine frigorifique-thermique montrent que la MFT exploite beaucoup mieux l'énergie d'entrée.



## 2.2 Les quatre systèmes

Dans le domaine de la climatisation, on distingue quatre systèmes de base.

### 1. Systèmes air-air

Systèmes air-air (p. ex. unités split) sont utilisés lorsque la chaleur ne peut pas être exploitée; il n'y a pas de demande ou l'utilisation de la chaleur n'est pas économique. Les unités split conviennent lorsque des pièces individuelles doivent être refroidies ou que de petites charges de refroidissement doivent être évacuées. Ces unités de refroidissement ont une relation étroite avec la pièce dans laquelle elles se trouvent et avec leur utilisation. Idéalement, elles ne sont enclenchées que lorsqu'elles sont réellement nécessaires. En outre, elles constituent – en termes d'investissement – une solution rentable, facile à manipuler et simple à utiliser. Cependant, la chaleur générée est libérée dans l'air extérieur sans être utilisée, et une «destruction d'énergie» a lieu. En outre, les unités extérieures situées sur la façade affectent la conception architecturale du bâtiment, et le bruit des ventilateurs peut être dérangent. Les systèmes air-air décrits sont généralement utilisés dans les petites installations de climatisation et ne sont pas décrits plus avant dans cet ouvrage technique.

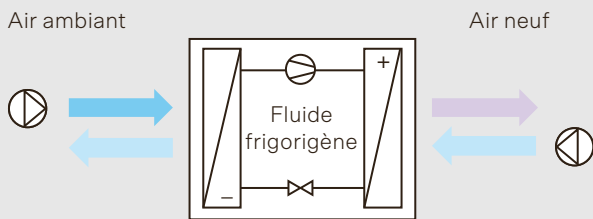


Illustration 2.2: Schéma d'un système air-air (p. ex. unité de refroidissement split).

### 2. Systèmes air-eau (pompe à chaleur)

Si le bâtiment présente un besoin de chauffage mais pas de refroidissement, seul le côté chaud de la machine est utilisé. On parle alors d'une pompe à chaleur. Les systèmes air-eau sont faciles à installer et peu coûteux. Les émissions sonores du ventilateur constituent un inconvénient. En outre, l'unité extérieure doit être nettoyée et entretenue régulièrement, sinon les performances diminuent et la susceptibilité aux dysfonctionnements augmente. Un autre inconvénient est que les systèmes air-eau sont les moins efficaces lorsque la demande de chauffage est la plus forte, car les températures extérieures très froides provoquent une forte augmentation du différentiel de température. C'est pourquoi ces machines ne sont utilisées que dans les régions à climat tempéré. Dans les régions froides où les températures de dimensionnement sont inférieures ou égales à  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , les systèmes air-eau ne conviennent au chauffage que de manière limitée.

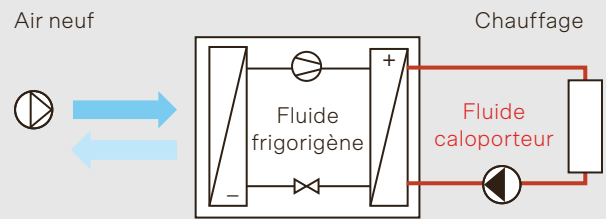


Illustration 2.3: Schéma d'un système air-eau (p. ex. PAC air-eau).

### 3. Systèmes eau-air

Systèmes eau-air (p. ex. machines frigorifiques classiques) sont utilisés dans les bâtiments devant uniquement être refroidis mais pas chauffés toute l'année. La chaleur produite ne peut être utilisée et est «détruite» – comme dans le cas des unités split. Lorsque la chaleur est évacuée par un aéroréfrigérant, l'installation affecte l'apparence du bâtiment. De plus, l'aéroréfrigérant est une source de bruit.

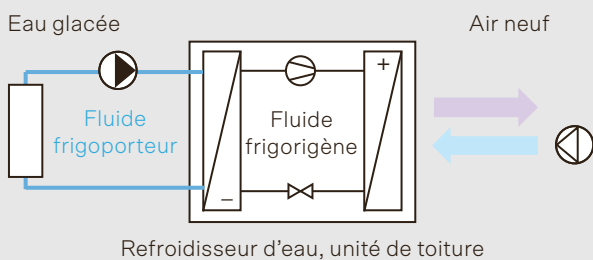


Illustration 2.4: Dans un système eau-air tel que la machine frigorifique classique, seul le côté froid est utilisé et la chaleur est transférée à l'air neuf.

### 4. Systèmes eau-eau

Dans le cas des systèmes eau-eau (machine frigorifique-thermique), l'énergie est utilisée tant du côté chaud que du côté froid. Cette variante est très efficace en termes de consommation d'électricité et réduit considérablement les coûts d'exploitation. Toutefois, les coûts d'investissement peuvent être plus élevés. Selon le concept, un transfert simultané de l'énergie, un stockage quotidien ou même un stockage saisonnier de l'énergie avec la sonde géothermique sont possibles ou nécessaires dans le cas des systèmes eau-eau.

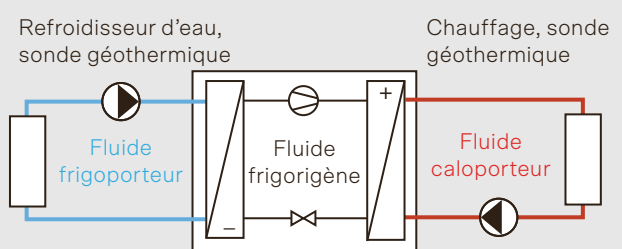


Illustration 2.5: Dans un système eau-eau (p. ex. machine frigorifique avec récupération de chaleur), les côtés chaud et froid du système sont tous deux utilisés.

### 2.3 Vue d’ensemble du système

Si l’on considère le système dans son ensemble, la chaleur engendrée par le refroidissement des locaux doit être utilisée en premier lieu dans le bâtiment lui-même. Lorsqu’il n’y a pas de demande de chaleur à certains moments, la chaleur doit être stockée (stockage quotidien ou stockage saisonnier dans le sol). La chaleur ne sera évacuée dans l’air, dans le sol, dans les eaux souterraines ou de surface, qu’une fois ces possibilités épuisées.

Cette manière de voir s’applique en particulier aux systèmes de climatisation d’une puissance de 20 à 300 kW décrits dans le présent ouvrage.

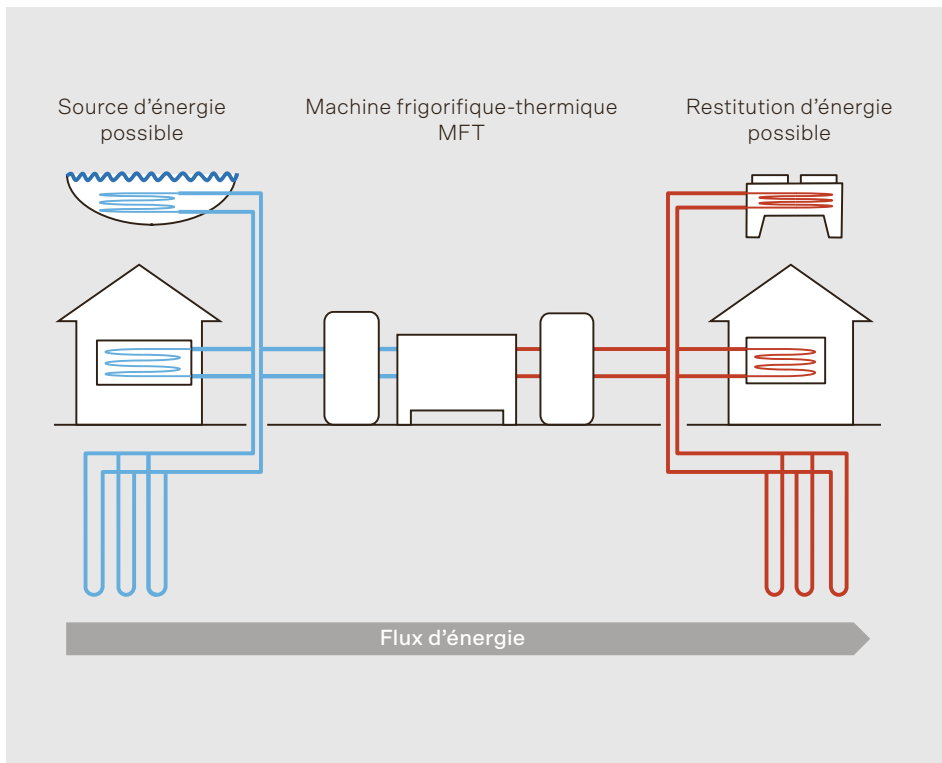


Illustration 2.6: Une vue globale permet d’examiner le flux d’énergie de la source d’énergie à la restitution de chaleur.

## 2.4 Principe de transfert de l'énergie

Le principe de transfert de l'énergie (stockage saisonnier) prévoit que l'excédent de chaleur disponible pendant les mois d'été (refroidissement, capteurs solaires) est transférée dans un accumulateur. Une approche intéressante est le stockage dans sa propre propriété au moyen d'un champ de sondes géothermiques. L'énergie est ensuite récupérée par une pompe à chaleur, alimentée à partir de la chaleur géothermique à basse température. Les systèmes de stockage saisonniers sont donc appelés accumulateurs à long terme; ils sont chargés pendant les mois d'été, par exemple, puis utilisés pendant les mois d'hiver.

Il faut veiller à ce que la quantité d'énergie stockée en été soit égale à celle prélevée en hiver. Sinon, l'installation de stockage géothermique se réchauffera ou se refroidira à long terme et perdra sa fonction d'accumulateur. Les flux énergétiques doivent donc être simulés sur une période de 50 ans. Pendant l'exploitation, les quantités d'énergie stockées et extraites de l'installation de stockage géothermique doivent être mesurées. Pour cela, il faut installer des équipements de mesure de haute qualité, car les différences de température sont souvent faibles et les imprécisions de mesure peuvent avoir un effet très important.

La difficulté du stockage saisonnier est qu'il nécessite généralement un espace

considérable pour emmagasiner suffisamment d'énergie. Cela rend généralement le stockage saisonnier beaucoup plus coûteux que le stockage à court terme et la technologie nécessaire plus complexe.

**Remarque:** Vue sur plusieurs années, la quantité d'énergie prélevée du stockage géothermique (zone 3 de l'illustr. 2.7) devrait être égale à la quantité d'énergie stockée (zone 2 de l'illustr. 2.7).

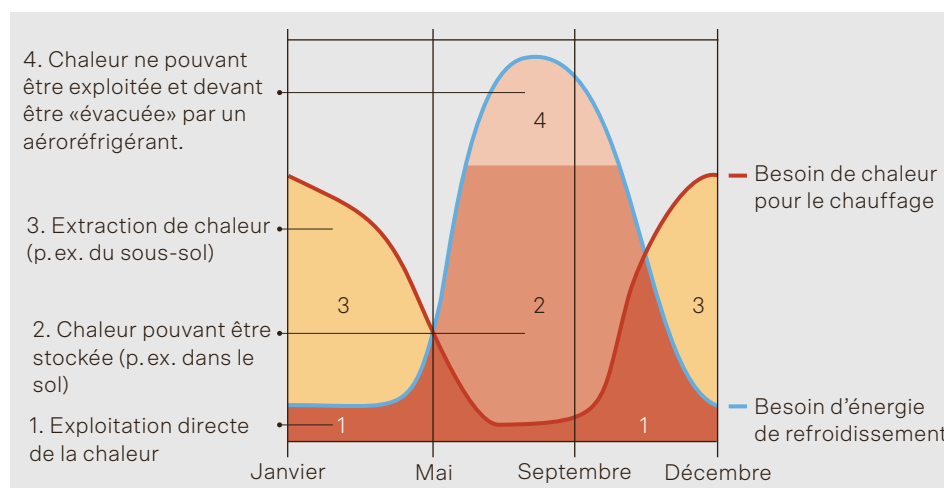
## 2.5 Considérations conceptuelles

### Comment trouver le système optimal?

Pour les bâtiments devant être refroidis, le concepteur doit toujours se questionner sur l'utilisation de la chaleur produite. L'arbre de décision présenté dans l'illustr. 2.8 montre comment trouver le système optimal.

Idéalement, la chaleur engendrée sera utilisée directement. Les concepts dotés d'une machine frigorifique-thermique sont donc particulièrement adaptés aux utilisations mixtes nécessitant un refroidissement et un chauffage. On peut les trouver, par exemple, dans des bâtiments combinant des activités commerciales et de services ainsi que des logements ou dans des bâtiments complexes tels que les hôpitaux. La machine frigorifique-thermique fonctionne à la fois dans un bâtiment et dans un site interconnecté.

Illustration 2.7:  
Avec le stockage saisonnier, l'énergie est stockée (p. ex. à l'aide de sondes géothermiques) dans un accumulateur géologique en été et peut être à nouveau prélevée en hiver.



### Effizienz et maîtrise du concept

De nombreux exploitants et gestionnaires immobiliers ont le préjugé que la technique du bâtiment fonctionne de manière entièrement automatique, effectuée de manière indépendante tous les réglages correctement et signale immédiatement si quelque chose ne va pas.

Toutefois, la pratique montre que la détection des «irrégularités» nécessite de nombreuses connaissances spécialisées – aujourd’hui encore plus qu’hier. Comme de nombreux exploitants ne disposent pas de ce savoir-faire, la «dérive» de l’installation passe souvent inaperçue. C’est pourquoi l’ensemble du système de refroidissement et de chauffage doit être simple et compréhensible, car les exploitants ne peuvent gérer eux-mêmes à long terme que des systèmes «simples». Plus le système est connecté et complexe, plus sa manipulation est exigeante. Même pour les petites interventions, il faut alors faire appel à un spécialiste (coûteux). Cela augmente le risque de modification des paramètres sans le savoir requis et, par conséquent, que l’installation ne fonctionnera plus correctement.

Du point de vue de l’efficacité globale, il peut donc être judicieux de préférer un concept simple et robuste – bien que moins économe en énergie – à une solution sophistiquée sur l’efficacité mais complexe.

### Coûts d’investissement par rapport à l’efficacité globale

Le coût total de l’installation se compose des coûts d’investissement, de service et de maintenance ainsi que des coûts énergétiques. En particulier, les investisseurs qui n’exploitent pas eux-mêmes l’installation de climatisation par la suite ne considèrent que les coûts d’investissement comme critère de sélection. Or, sur la durée de vie de l’installation, les coûts d’exploitation dépassent largement les coûts d’investissement. Il est donc intéressant, d’un point de vue commercial, d’analyser les coûts en conséquence.

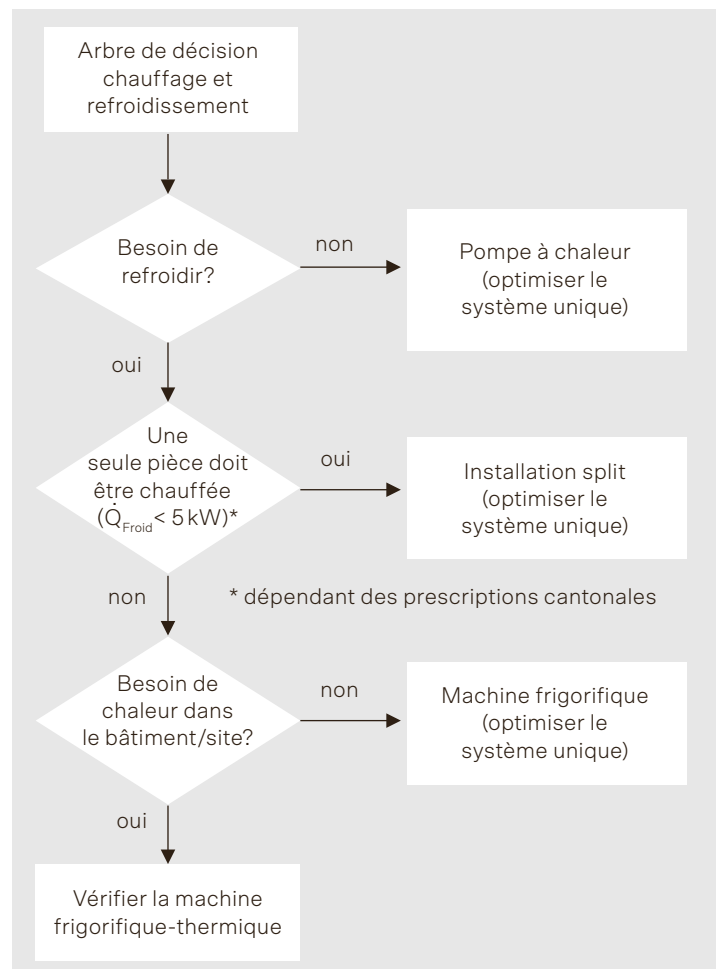
Coûts totaux =

- coûts d’investissement
- + coûts annuels de service/maintenance sur 15 ans
- + coûts énergétiques annuels sur 15 ans

Les coûts d’investissement comprennent les dépenses pour les installations techniques auxquels s’ajoutent les coûts pour:

- le local d’installation (espace transformé)
- l’équipement électrique (évent. installation ATEX)
- la ventilation (évent. ventilation tempête par apport d’air neuf)
- la protection incendie (désenfumage)
- les dispositifs de sécurité (évent. système d’alerte au gaz, système d’alarme incendie)
- les voies d’évacuation (évent. escalier extérieur)

Illustration 2.8: Arbre de décision pour le choix du système de chauffage et de refroidissement.



Les coûts d'investissement, d'entretien et de maintenance ainsi que les coûts énergétiques doivent être enregistrés pour tous les corps de métier et optimisés en conséquence. L'expérience montre, par exemple, qu'avec une machine frigorifique un peu plus coûteuse, mais fonctionnant de manière silencieuse et équipée d'un convertisseur de fréquence, ces coûts supplémentaires sont plus que compensés par les économies réalisées sur la compensation du courant réactif et les mesures d'insonorisation.

### Disponibilité et redondance

Les redondances des machines (disponibilité, sécurité) dépendent des exigences de disponibilité du refroidissement et du chauffage dans le bâtiment. Il convient de clarifier avec le propriétaire du bâtiment ce qu'il advient des différents processus (p.ex. habitat, travail, production) en cas de défaillance du système de refroidissement. Un système de feux de circulation convient à cet effet:

- Processus toujours possible
- Processus possible dans une mesure limitée
- Processus plus possible

Sur la base des résultats du système de feux de circulation, la redondance des machines peut être déterminée par la méthode «n+1». Si, par exemple, on choisit n = 3, quatre composants sont installés à 33% en branchement parallèle. Grâce à ce concept de redondance, un composant peut donc tomber en panne (ou être en maintenance) et la capacité totale reste disponible (voir également Chapitre 4.2).

Un autre concept est la redondance partielle. Lorsque deux machines sont prévues avec une puissance de 50% chacune et qu'une des machines frigorifiques tombe en panne, la moitié de la puissance reste disponible. Par conséquent, avec une redondance partielle, la défaillance d'un composant signifie que le système ne couvre qu'une partie de la demande de refroidissement.

En outre, un plan doit être mis en place pour le cas où toutes les machines tomberaient en panne en même temps (p.ex. une panne de courant ou une alarme incendie dans la centrale technique).

### Lieu d'installation

Dans la salle des machines et l'aéroréfrigérant, les critères suivants sont importants pour la planification:

- Espace requis
- Bruit
- Vibrations
- Besoin de ventilation
- Type de fluide frigorigène
- Poids

### Prêter une attention particulière au bruit

aéroréfrigérants ou les unités de toiture, les exigences des autorités locales en matière de construction doivent être respectées. Souvent, un permis de construire avec attestation de protection contre le bruit est nécessaire, et une simulation peut être exigée. Afin de minimiser les émissions sonores du système la nuit, celui-ci peut être exploité à mi-puissance pendant les heures de nuit et donc plus silencieusement.

### Les limites de la machine frigorifique-thermique

Dans les zones très densément peuplées avec une forte demande de froid, il est souvent difficile de trouver un acquéreur de chaleur. Il s'agit notamment de centres-villes avec de nombreux magasins et bureaux mais peu de logements. Lorsqu'il n'y a pas de réseau de chauffage, dans ce cas, il n'y a pas d'autre choix que d'évacuer la chaleur dans l'environnement.

Dans ces zones, il est souvent difficile de créer un post-refroidissement répondant à toutes les exigences: bien intégré sur le plan architectural, correctement placé sur le plan technique (emplacement frais) et insonorisé (pas de bruit gênant – surtout la nuit).

Par conséquent, les réseaux de froid urbain (ou de chauffage «froid» à distance) sont de plus en plus souvent installés dans les centres-villes. Ceux-ci contribuent à la réduction de la surchauffe des centres-villes (appelés îlots de chaleur).

## 2.6 Tendances en matière de froid de confort

«Les prédictions sont difficiles, surtout lorsqu'elles concernent l'avenir».<sup>1</sup> Néanmoins, il existe plusieurs évolutions et tendances qui ont déjà un effet sur le refroidissement du climat aujourd'hui – et qui pourraient le façonner à l'avenir.

### Fluides frigorigènes naturels

Pour les installations de refroidissement écologiques et efficaces, l'accent est mis sur les machines utilisant des réfrigérants naturels: R290 (propane) ou R1270 (propène) ainsi que R717 (NH<sub>3</sub>, ammoniac) et R744 (CO<sub>2</sub>, dioxyde de carbone). Une efficacité plus élevée et des volumes de remplissage de fluide frigorigène plus faibles sont d'autres avantages des fluides naturels d'un point de vue technique.

### Refroidir au lieu de chauffer

On construit de plus en plus de bâtiments nécessitant moins de chauffage mais plus de refroidissement. À cet égard, la climatisation est susceptible de gagner en importance dans la technique du bâtiment.

### Refroidir avec l'énergie solaire

Dans les machines frigorifiques à compresseur, la force motrice provient d'un moteur électrique. Le besoin en énergie peut donc être couvert par une installation photovoltaïque. Cependant, le froid peut également être produit par la chaleur solaire. Les machines frigorifiques requises pour ce travail selon les principes de l'absorption ou de l'adsorption (voir digression «Machines frigorifiques à absorption» à la page 85).

### Stocker la chaleur du froid de confort

Le stockage de la chaleur issue du froid de confort occupe les chercheurs depuis longtemps. L'objectif est de «transférer»

la chaleur du jour à la nuit ou de l'été à l'hiver.

### Stockage par changement de phase ou stockage latent

Les systèmes de stockage à changement de phase utilisent le changement de l'état d'un milieu, de liquide à solide, sans changement de température. L'énergie est absorbée ou évacuée pendant ce changement – on parle alors de «chaleur latente». L'avantage est que l'on peut stocker beaucoup plus d'énergie dans un accumulateur à changement de phase que dans un accumulateur classique utilisant de l'eau.

Cependant, à l'exception du stockage de la glace, ce type de stockage d'énergie, conçu pour une température spécifique, ne s'est pas encore imposé, probablement pour des raisons de coût.

### Stockage saisonnier

Pour le stockage saisonnier, on utilise le sol (ce qu'on appelle le stockage géothermique). La chaleur est stockée dans le sol (roche) en été via un champ de sondes géothermiques et extraite en hiver.

### Utilisation accrue d'installations compactes

Installations compactes (p.ex. installations sur le toit) sont susceptibles d'attirer davantage l'attention. De telles installations sont généralement plus simples et moins coûteuses, mais pas nécessairement plus efficaces sur le plan énergétique.

### Compresseurs à vitesse réglée

Les compresseurs à vitesse de rotation réglée (20 à 100 %) sont susceptibles de gagner des parts de marché et de remplacer de plus en plus les systèmes à commutation par paliers.

### Compresseurs à densité de puissance plus élevée

Dans le domaine des compresseurs, la tendance est aux machines de plus en plus petites et rapides (p.ex. les turbocompresseurs).

<sup>1</sup> Termes mystérieux, dont on ne sait pas s'ils émanent de Karl Valentin (cabarettiste), Mark Twain (écrivain) ou Niels Bohr (scientifique).

## 10 points relatifs à l'ensemble du système de climatisation

1. Pour une atmosphère intérieure agréable, le bâtiment doit toujours être considéré en tant que système global.
2. La machine frigorifique-thermique combine les besoins de refroidissement et de chauffage du bâtiment.
3. Une machine frigorifique-thermique exploite l'énergie plus efficacement qu'une pompe à chaleur séparée pour le chauffage et une machine frigorifique pour le refroidissement (transfert d'énergie interne au bâtiment).
4. Il existe quatre systèmes de climatisation:
  - Systèmes air-air tels que les installations frigorifiques split
  - Systèmes air-eau tels que la pompe à chaleur air-eau (solution de chaleur pure)
  - Les systèmes eau-air, la machine frigorifique classique
  - Systèmes eau-eau, machine frigorifique avec utilisation de la chaleur (machine frigorifique-thermique)
5. La chaleur doit d'abord être utilisée directement dans le bâtiment ou le site. Lorsque cela n'est pas possible, il faut envisager un accumulateur intermédiaire. Lorsque ce n'est pas non plus possible, il faut évacuer la chaleur de la manière la plus efficace possible via l'aéroréfrigérant.
6. La machine frigorifique-thermique permet une redistribution de l'énergie (stockage saisonnier) via les sondes géothermiques et le stockage géothermique.
7. Efficience et maîtrise du concept: planifier un système global facile à comprendre, afin que les exploitants puissent le gérer eux-mêmes à long terme.
8. Lors des décisions d'investissement, il faut tenir compte du coût total du système sur toute sa durée de vie.
9. Les exigences en matière de disponibilité de froid et de chaleur dans le bâtiment concerné constituent le point de départ de la définition des redondances des machines frigorifiques (disponibilité, sécurité).
10. Les principaux défis de la gestion technique du bâtiment à l'avenir concerneront certainement le refroidissement des bâtiments, et non leur chauffage.

## Bases

**Le cycle est la clé de la compréhension de la machine frigorifique. Les quatre phases du cycle utilisent les changements de température, de pression et d'état du fluide frigorigène pour transférer l'énergie vers des niveaux de chaleur ou de froid exploitables. Le diagramme log p,h représente ce processus complexe de manière compréhensible. Les différents fluides frigorigènes jouent un rôle important en ce qui concerne la technologie du système, la conception et l'environnement.**

### 3.1 Processus du froid

Le terme «froid» désigne le flux de chaleur qui est extrait d'une pièce. Étant donné que la chaleur circule toujours d'une température plus élevée vers une température plus basse, il faut, pour refroidir une pièce, un système dont la température est plus basse et qui peut absorber la chaleur de la pièce. Autrefois, la glace présente dans la nature était stockée en hiver et utilisée pour le refroidissement en été. Aujourd'hui, nous utilisons des machines frigorifiques à cette fin. Les machines frigorifiques actuelles sont basées sur les phénomènes suivants:

#### Détente du gaz

Lorsqu'un gaz est détendu d'une pression élevée à la pression ambiante, il se refroidit (p. ex. le refroidissement de l'air lors de l'ouverture d'une conduite d'air comprimé). Ce processus est appelé **l'effet Joule-Thomson**.

La température du gaz après détente dépend non seulement de la pression et de la température avant détente, mais aussi du type de gaz.

#### Utilisation de la chaleur de vaporisation

Lorsqu'un liquide s'évapore ou bout, il se produit un changement d'état de liquide à gazeux. Il faut de l'énergie pour séparer les molécules les unes des autres. Cette

énergie peut être fournie de l'extérieur sous forme de chaleur (exemple: bouillir de l'eau).

La quantité de chaleur à apporter entre l'évaporation des premières molécules et l'évaporation de la dernière goutte de liquide est appelée **chaleur de vaporisation**. La chaleur fournie est utilisée exclusivement à cette fin pendant tout le processus d'évaporation – il n'y a donc pas d'augmentation de la température pendant cet apport de chaleur.

La température à laquelle l'évaporation a lieu (la **température d'évaporation**) est déterminée par la pression à laquelle un fluide frigorigène particulier est soumis. Lorsque la pression augmente, la température d'évaporation augmente également (c.-à-d., que l'état d'évaporation est à une température plus élevée). Lorsque la pression est abaissée, l'évaporation a lieu à des températures plus basses. Si la pression est appropriée, l'évaporation a lieu à des températures

#### L'air comme médium frigoporteur

En théorie, l'air peut également être exploité comme médium frigoporteur. Il est prélevé dans l'environnement, comprimé, refroidi et à nouveau détendu. De cette manière, il peut être renvoyé froid dans l'environnement (p. ex. dans une chambre froide). Mais en termes d'efficacité énergétique, l'air en tant que médium frigoporteur est très peu performant. Les machines frigorifiques exploitant l'air de cette façon ne sont donc guère adaptées d'un point de vue technique. Lorsqu'un médium autre que l'air est utilisé, un tel processus «ouvert» n'a aucun sens sur le plan écologique, technique ou économique. En effet, le gaz froid présent dans la pièce ne doit pas mettre en danger ou nuire aux personnes, aux marchandises réfrigérées ou à l'environnement. Pour cette raison, tous les autres médiums frigoporteurs fonctionnent en cycle fermé.



inférieures à la température ambiante. La chaleur passe alors de l'environnement au fluide frigorigène – et l'environnement se refroidit.

Pour la réalisation technique de ce procédé, il faut mettre en place un circuit fermé pour un fluide frigorigène. Un compresseur aspire le fluide frigorigène sous forme gazeuse et le comprime à un niveau de pression plus élevé. Pour obtenir une différence de pression, il faut également placer une résistance à l'écoulement dans le cycle. Il peut s'agir d'une conduite d'étranglement ou d'un détendeur variable.

Du côté aspiration, le compresseur réduit la pression (basse pression) et veille à ce que le fluide frigorigène liquide puisse s'évaporer dans l'évaporateur situé avant lui, comme décrit ci-dessus. Le compresseur détermine ainsi la pression d'évapo-

ration  $p_0$  et donc aussi la température d'évaporation  $T_0$  dans l'évaporateur. Il suffit donc d'ajouter suffisamment de fluide frigorigène liquide pour qu'il puisse s'évaporer. Dans un circuit fermé, celui-ci ne peut provenir que du côté pression du compresseur (haute pression).

Lorsqu'un compresseur comprime un fluide frigorigène sous forme gazeuse, celui-ci est chauffé de manière significative en raison de la loi des gaz. En outre, les pertes par frottement pendant la compression augmentent encore la température du fluide frigorigène. Le gaz frigorigène comprimé est appelé gaz chaud et doit être renvoyé dans l'évaporateur, mais sous forme liquide. Il doit donc être refroidi et condensé. L'environnement est beaucoup plus froid que le gaz chaud et peut donc contribuer à refroidir le gaz chaud et à le liquéfier dans le condenseur. La condensation à haute pression se produit à une température  $T_C$  beaucoup plus élevée que l'évaporation en raison de la pression  $p_C$  ( $T_C > T_0$ ). Le fluide frigorigène sous forme liquide peut maintenant revenir à la basse pression par l'intermédiaire du détendeur. Il réduira considérablement sa température et entrera froid dans l'évaporateur. L'effet Joule-Thompson ainsi que l'influence de la chaleur de vaporisation entrent ici en jeu.

#### Chaleur sensible et latente

Un apport de chaleur entraînant une modification de la température, c'est-à-dire sans modification de l'état, peut être «ressenti» via la température – on parle alors de chaleur sensible.

Un apport de chaleur avec un changement d'état a lieu à température constante – c'est ce qu'on appelle la chaleur latente.

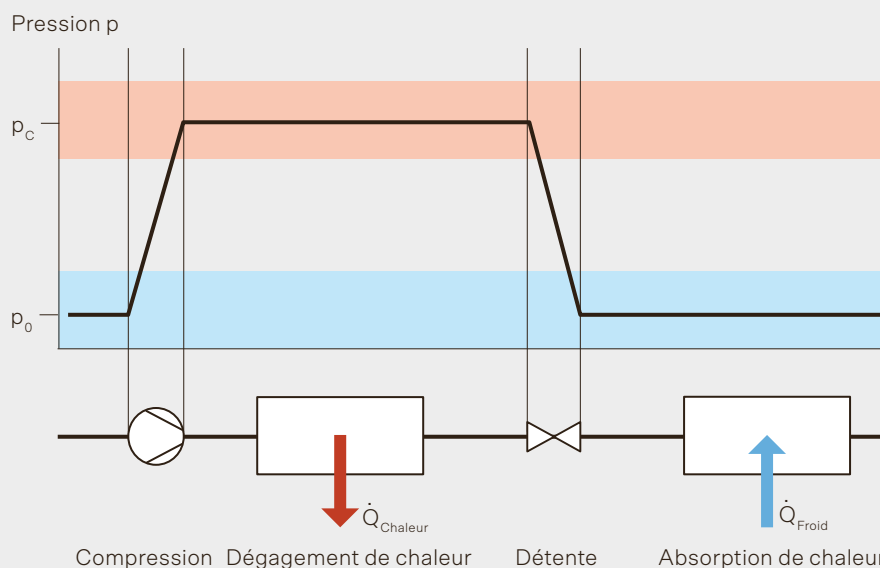


Illustration 3.1:  
Schéma montrant  
les quatre compo-  
sants principaux du  
circuit de froid et les  
deux niveaux de  
pression à l'intérieur  
du circuit.

Ce cycle décrit du fluide frigorigène a un côté froid où la chaleur est absorbée par le poste frigorifique ( $\dot{Q}_{\text{Froid}}$ ) et un côté chaud où la chaleur est évacuée ( $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$ ). Lorsque le niveau de température est suffisant, le côté chaud peut être utilisé, p.ex. pour fournir de la chaleur à un circuit de chauffage (utilisation chaud-froid). Le circuit se compose des principaux éléments suivants:

- Compresseur
- Échangeur de chaleur à haute pression pour l'évacuation de la chaleur (condenseur)
- Détendeur pour l'expansion du côté basse pression
- Échangeur de chaleur à basse pression pour l'absorption de chaleur (évaporateur)

Ce cycle est le type de refroidissement le plus utilisé dans le froid de confort. Les machines correspondantes sont appelées machines frigorifiques à compression. Le cycle est représenté dans l'illustration 3.1 comme un processus sur une ligne. Après l'absorption de la chaleur (évaporation), la compression recommence du côté gauche.

### 3.2 Le diagramme log p,h

Pour le dimensionnement des quatre composants (processus partiel: compression, évacuation de chaleur, détente, absorption de chaleur), il faut disposer d'informations sur le contenu énergétique du fluide frigorigène. Ce contenu est représenté par la quantité thermodynamique enthalpie  $h$  et est donné en kJ/kg.

L'enthalpie d'un fluide frigorigène peut être influencée par l'ajout ou l'évacuation de chaleur ou par l'ajout ou l'évacuation de travail technique. Pour un système partiel général avec une entrée  $e$  et une sortie  $a$ , cette relation peut être formulée comme un théorème d'énergie:

$$q_{e,a} + w_{te,a} = h_a - h_e$$

- $q_{e,a}$  Quantité de chaleur ajoutée ou évacuée, en kJ/kg
- $w_{te,a}$  Travail technique ajouté ou évacué, en kJ/kg
- $h_e$  Enthalpie à l'entrée du système partiel, en kJ/kg
- $h_a$  Enthalpie à la sortie du système partiel, en kJ/kg

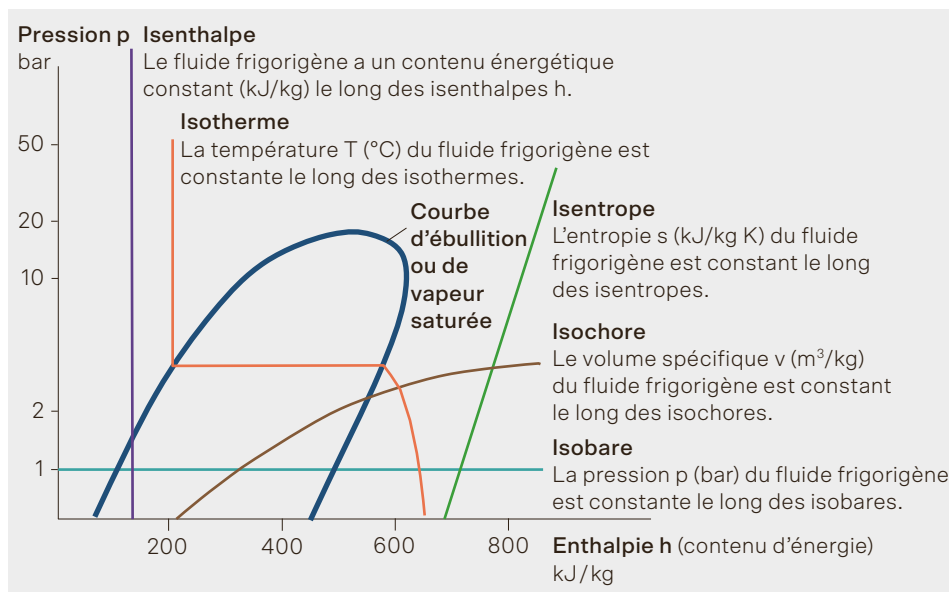
Les grandeurs utilisées ici sont en kJ/kg. Lorsqu'elles sont multipliées par le débit massique du fluide frigorigène en kg/s, on obtient des puissances en kJ/s, identiques aux kilowatts (kW).

Le processus de froid peut maintenant être calculé sur la base du contenu d'énergie du fluide frigorigène, en utilisant les niveaux de haute et basse pression et en spécifiant l'enthalpie. Il est donc pratique de représenter le processus de froid par un diagramme pression-enthalpie (Illustr. 3.2). Les haute et basse pressions sont alors immédiatement visibles et les changements d'énergie peuvent être lus directement dans le diagramme (log p,h) tout comme la différence d'enthalpie. Étant donné qu'un compresseur peut multiplier la pression par dix environ, la pression est représentée de manière logarithmique et le diagramme est donc appelé diagramme log p,h. Les pressions doivent être comprises comme des pressions absolues.

#### Enthalpie

L'enthalpie – autrefois également appelée contenu thermique – fournit des informations sur la quantité d'énergie (kJ) qu'un système échange avec son environnement. L'enthalpie ( $H$ ) est la somme de l'énergie interne ( $U$ ) du système et du produit de la pression ( $p$ ) et du volume ( $V$ ) du système  $H = U + pV$ . Rapporté à 1 kg d'une substance, on obtient l'enthalpie spécifique  $h$  (kJ/kg), qui est utilisée dans ce qui suit et qui, par souci de simplicité, est appelée en bref enthalpie.

Illustration 3.2:  
Le diagramme log p,h montre le contenu d'énergie sur l'abscisse et la pression sur l'ordonnée logarithmique. Les différentes lignes avec des variables d'état constantes sont également dessinées.



Dans le diagramme log p,h (Illustr. 3.2), outre la pression et l'enthalpie, d'autres variables d'état sont saisies avec des lignes de valeurs constantes: la température T, le volume spécifique v (réciproque de la densité) et l'entropie s. L'entropie est donnée en kJ/(kg K). Elle reste constante lorsqu'un processus est réversible, sans perte et sans échange de chaleur avec l'environnement. Une entropie constante est appelée isentropique. Elle représente le cas idéal absolu de compression et de détente. Dans le cycle de la machine frigorifique, l'entropie ne peut diminuer que si elle quitte le système à l'aide de l'évacuation de la chaleur.

Dans le diagramme log p,h (Illustr. 3.2), outre la pression et l'enthalpie, d'autres variables d'état sont saisies avec des lignes de valeurs constantes: la température T, le volume spécifique v (réciproque de la densité) et l'entropie s. L'entropie est donnée en kJ/(kg K). Elle reste constante lorsqu'un processus est réversible, sans perte et sans échange de chaleur avec l'environnement. Une entropie constante est appelée isentropique. Elle représente le cas idéal absolu de compression et de détente. Dans le cycle de la machine frigorifique, l'entropie ne peut diminuer que si elle quitte le système à l'aide de l'évacuation de la chaleur. L'illustration 3.3 montre la zone de vapeur humide. Elle est située entre la ligne de li-

quide saturé et la ligne de vapeur saturée. Lorsque de la chaleur est ajoutée au liquide dans un échangeur de chaleur, ce processus se déroule le long d'une isobare (c.-à-d. à pression constante) horizontalement de gauche à droite dans le diagramme log p,h (ligne A → B). Tout d'abord, la température du liquide continue à augmenter et finalement l'évaporation commence à la ligne de liquide saturé (premières bulles de gaz). Un apport supplémentaire de chaleur se poursuit ensuite à température constante le long des isobares, horizontalement à travers la zone de vapeur humide (présence simultanée de liquide et de gaz). Lorsque la ligne de vapeur saturée est atteinte, la dernière partie du liquide s'est également évaporée et un nouvel apport de chaleur entraîne à nouveau une augmentation de la température du gaz maintenant surchauffé.

Les premières gouttelettes de liquide se forment lorsqu'elles atteignent la ligne de vapeur saturée. Après avoir traversé la zone de vapeur humide vers la gauche (la température et la pression restant constantes), toute fraction de gaz est condensée en atteignant la ligne de liquide saturé et la température du liquide sous-refroidie diminue avec l'augmentation de l'évacuation de chaleur.

L'enthalpie de vaporisation figure dans le diagramme log p,h comme distance

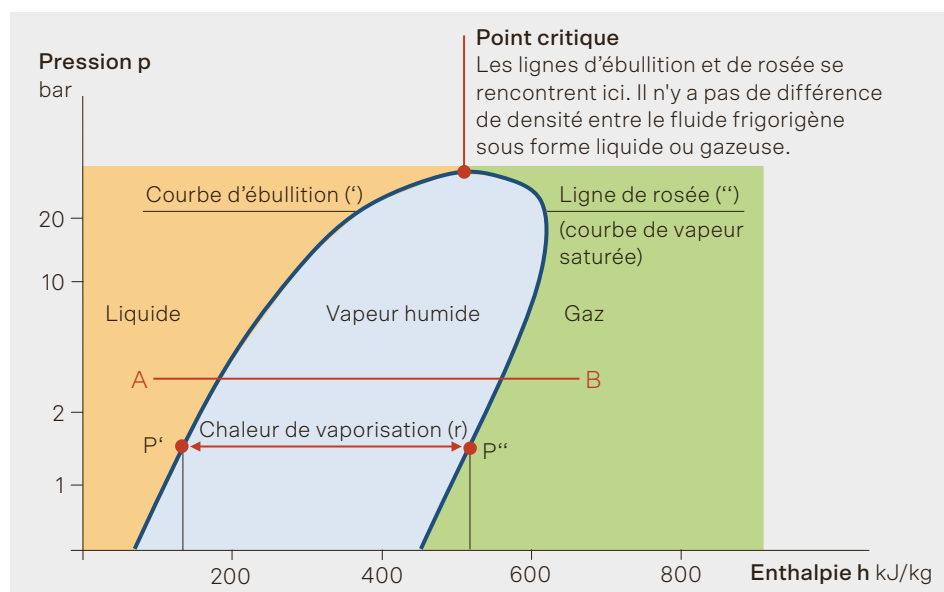


Illustration 3.3: Diagramme log p,h montrant la zone de vapeur humide où liquide et vapeur existent simultanément. La différence d'enthalpie entre le point sur la ligne d'ébullition (P') et le point sur la ligne de rosée (P'') est la chaleur de vaporisation (r).

horizontale entre les lignes de liquide saturé et de vapeur saturée. Cet état d'ébullition dépend de la pression. Avec l'augmentation de la pression, l'enthalpie spécifique de vaporisation diminue, c'est-à-dire que la plage de température constante se réduit.

### 3.3 Le cycle de Carnot comme comparaison idéale

La compréhension des processus idéaux est importante pour le planificateur d'installations frigorifiques. Le processus idéal est une information précieuse lorsqu'il s'agit d'identifier le potentiel d'amélioration du processus réel.

Le cycle idéal des moteurs thermiques a été étudié pour la première fois en 1824 par le fondateur de la thermodynamique, N.-L. Sadi Carnot. Il a postulé qu'un processus inverse à celui de la machine à vapeur<sup>1</sup> devait exister – quasiment l'invention de la machine frigorifique ou de la pompe à chaleur.

Le cycle de Carnot se compose de deux processus partiels fonctionnant à entropie constante (compression isentropique et détente isentropique) et de deux processus partiels dans lesquels la chaleur est fournie et retirée de manière isotherme (c.-à-d. à température constante). Il peut donc être décrit assez simplement par deux **isothermes** et deux **isentropes**.

Le cycle de Carnot se compose de deux processus partiels fonctionnant à entropie constante (compression isentropique et détente isentropique) et de deux processus partiels dans lesquels la chaleur est fournie et retirée de manière isotherme (c.-à-d. à température constante). Il peut donc être décrit assez simplement par deux isothermes et deux isentropes. Le cycle de Carnot peut également être évalué par le biais d'un rendement. À cette fin, on considère le rapport entre les avantages et les coûts. Le bénéfice d'une machine frigorifique est la production de chaleur absorbée (puissance fri-

gorifique  $\dot{Q}_{\text{Froid}}$ ) – le coût est la puissance mécanique du compresseur P. Comme le rapport bénéfice/coût est ici supérieur à 1, on parle de coefficient de performance  $\epsilon$  et non plus de rendement  $\eta$ .

Sur la base de considérations idéales, le coefficient de performance de Carnot peut être calculé par le rapport entre la température lors de la chaleur absorbée ( $T_0$ ) et la course de température entre l'absorption et l'évacuation de la chaleur ( $T_c - T_0$ ) sans connaître les puissances:

$$\epsilon_{\text{Carnot}} = \frac{T_0}{T_c - T_0}$$

Équation 3-1

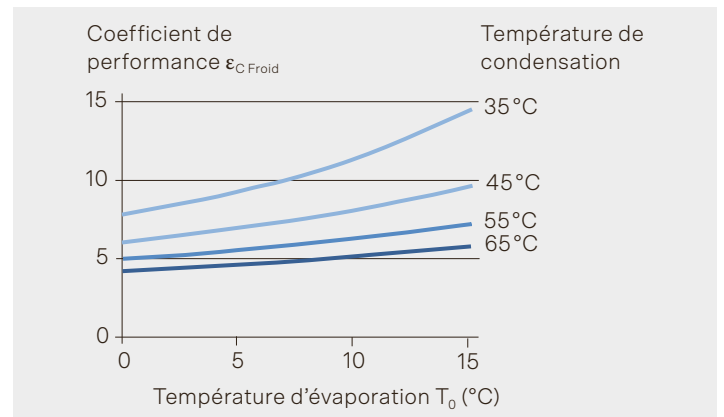
Les températures doivent être appliquées dans l'échelle de température absolue Kelvin (K) ( $0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$ ).

L'équation 3-1 permet de calculer très simplement le coefficient de performance théoriquement maximal réalisable d'une machine frigorifique. Elle est inatteignable pour une vraie machine et documente les limites physiques.

L'examen de l'équation montre les leviers théoriques permettant d'améliorer la puissance: Une faible course de température ( $T_c - T_0$ ) et une augmentation de la température de refroidissement  $T_0$  conduisent directement à une amélioration. L'illustration 3.4 montre cette relation.

Le terme «pompe à chaleur» désigne la même machine que celle considérée jusqu'à présent, sauf que l'avantage d'une pompe à chaleur se situe du côté chaud ( $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$ ). En conséquence, le coef-

Illustration 3.4: Coefficients de performance théoriques d'une machine frigorifique  $\epsilon_{\text{Carnot}}$  à différentes températures de liquéfaction et d'évaporation, en °C.



<sup>1</sup> Dans la machine à vapeur, l'énergie du gaz chaud est transformée en énergie mécanique.

coefficient de performance de Carnot d’une pompe à chaleur  $\epsilon_{c\text{ PAC}}$  est calculé avec la température de condensation  $T_c$ :

$$\epsilon_{c\text{ PAC}} = \frac{T_c}{(T_c - T_0)}$$

Équation 3-2

Un équilibre de puissance sur l’ensemble de la machine conduit à la relation suivante entre les deux coefficients de performance de Carnot:

$$\epsilon_{c\text{ Chaleur}} = \epsilon_{c\text{ Froid}} + 1$$

Équation 3-3

Le cycle de Carnot est absolument le meilleur cycle pouvant être mis en œuvre. Les cycles réels ne peuvent jamais l’atteindre, mais ils peuvent très bien l’utiliser comme idéal pour identifier un poten-

tiel d’amélioration. Lors de la conception d’une machine, l’ingénieur peut essayer de rapprocher son processus du cycle de Carnot. Ou bien il peut utiliser les équations 3-1 ou 3-2 pour évaluer si un changement dans les conditions de fonctionnement choisies pourrait conduire à une machine plus efficace.

### 3.4 Utiliser le changement d’état

Lorsque le niveau de pression dans une machine frigorifique à compression est choisi de telle sorte que le fluide frigorigène puisse s’évaporer et se condenser, les zones importantes d’absorption et de libération de chaleur se situent dans la plage de vapeur humide, c’est-à-dire à des températures constantes.

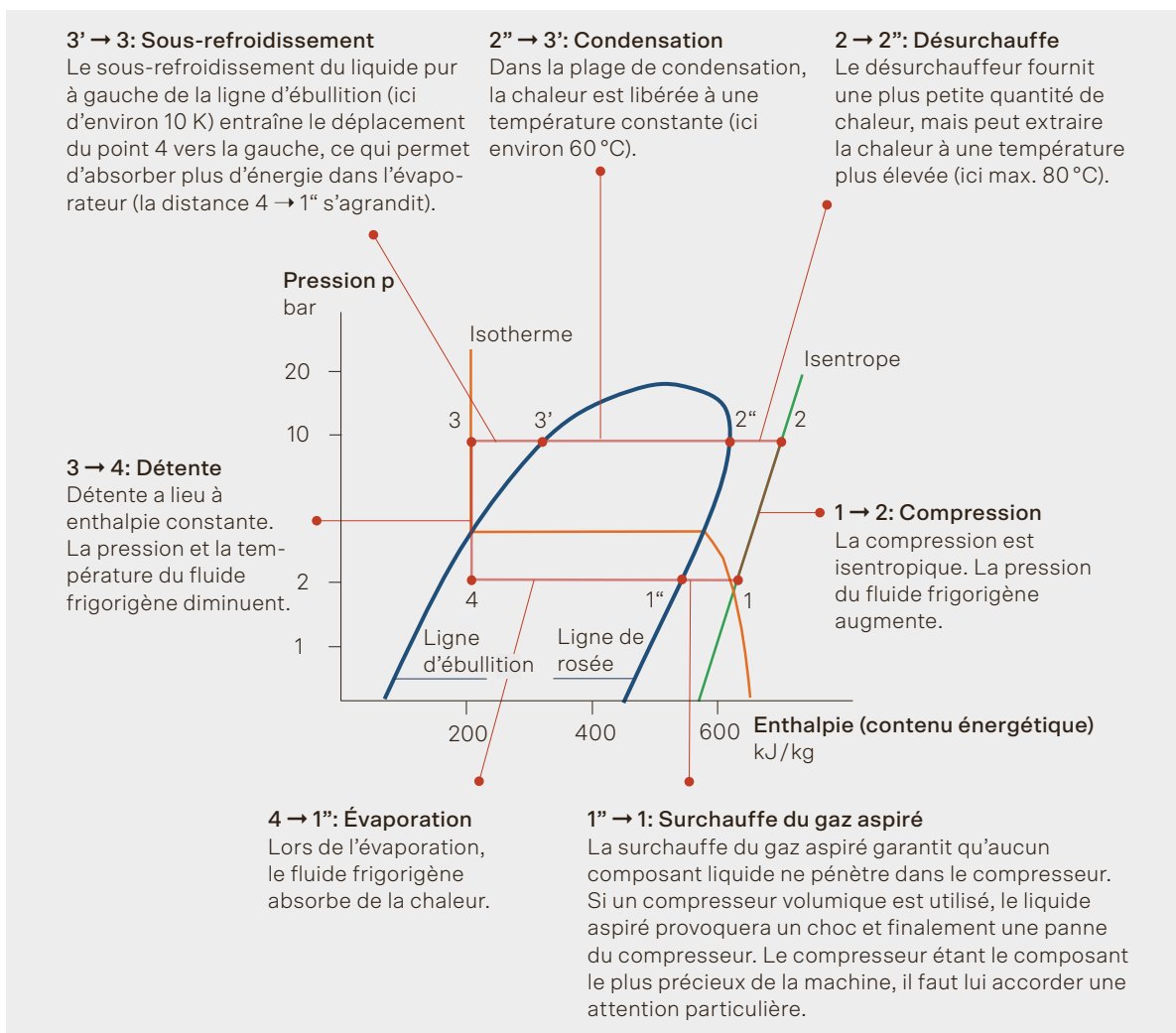


Illustration 3.5: Les changements d’état (idéaux) du processus de refroidissement.

Ceci est pratique pour la réalisation technique (déterminer la température de refroidissement), fournit une quantité de chaleur utilisable supplémentaire (chaleur latente) et rapproche le processus du cycle idéal de Carnot en raison des grandes parties isothermes.

### Conditions de pression et de température dans la machine frigorifique à compression

Les conditions de pression et de température des quatre composants centraux de la machine frigorifique à compression peuvent être illustrées dans quatre quadrants (Illustr. 3.6). Les quadrants diffèrent par la pression, la température et l'état du fluide frigorigène.

### 3.5 Flux d'énergie dans la machine frigorifique

La représentation du processus dans le diagramme log p,h permet de comprendre quelle énergie est convertie à quel moment. Toute augmentation ou diminution d'énergie peut être lue directement à partir de la variation d'enthalpie. Un bilan de puissance sur l'ensemble de la machine fournit la base pour comprendre les flux d'énergie. La convention veut que les puissances fournies aient des valeurs numériques positives et que les puissances évacuées aient des valeurs numériques négatives. Un équilibre des puissances signifie que la somme de toutes les puissances dépassant la limite du système doit être égale à zéro. La puissance de refroidissement  $\dot{Q}_{\text{Froid}}$ , la puissance de chaleur évacuée  $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$  et la puissance d'entraînement électrique

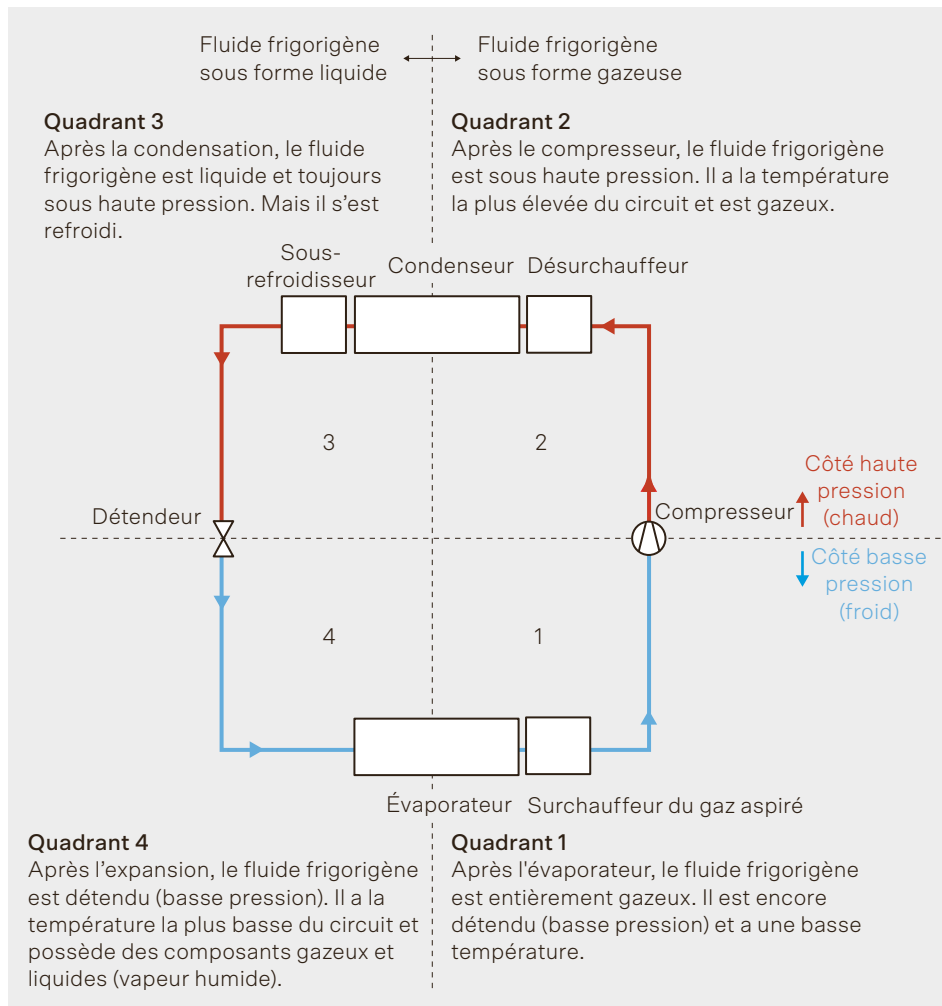


Illustration 3.6: Conditions de pression et de température dans la machine frigorifique à compression.

du compresseur fournie ( $P_{\text{él}}$ ) se présentent comme des puissances. L'équation 3-4 montre comment la puissance de refroidissement et la puissance d'entraînement du compresseur s'additionnent pour donner la puissance de chaleur évacuée:

$$\dot{Q}_{\text{Froid}} + P_{\text{él}} = -\dot{Q}_{\text{Chaleur}} \quad \text{Équation 3-4}$$

- $\dot{Q}_{\text{Froid}}$  Puissance thermique ajoutée (puissance frigorifique), en kW
- $P_{\text{él}}$  Puissance électrique ajoutée au compresseur, en kW
- $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$  Puissance thermique évacuée, en kW

Formulées en enthalpies spécifiques, les différences peuvent être trouvées dans le diagramme log p,h dans l'illustr. 3.7.

$$(h_1 - h_4) + (h_2 - h_1) = h_2 - h_3 \quad \text{Équation 3-5}$$

Il est intéressant de suivre le parcours de l'énergie dans la machine frigorifique. L'illustration 3.8 montre ces flux énergétiques à l'aide d'un diagramme de Sankey (diagramme des flux énergétiques).

Le flux d'énergie illustre la mesure du flux de chaleur fourni et évacué. Au niveau du détenteur, on reconnaît le flux d'énergie de la haute à la basse pression avec la baisse de température associée. Dans l'évaporateur, la chaleur absorbée par le poste frigorifique est ajoutée et la somme des deux est transportée vers le compresseur. Seule la puissance d'entraînement est alors ajoutée et la température augmente jusqu'au gaz chaud. La majeure partie de l'énergie quitte alors la machine dans le condenseur sous forme de chaleur et le reste retourne à la vanne de détente.

Le taux d'énergie peut être configuré pour chaque étape partielle (voir aussi la section sur le diagramme log p,h).

$$q + w_t = h_{\text{HORS}} - h_{\text{EN}}$$

- $q$  Quantité de chaleur ajoutée ou évacuée, en kJ/kg
- $w_t$  Travail technique ajouté ou évacué, en kJ/kg
- $h_{\text{EN}}$  Enthalpie à l'entrée du système partiel, en kJ/kg
- $h_{\text{HORS}}$  Enthalpie à la sortie du système partiel, en kJ/kg

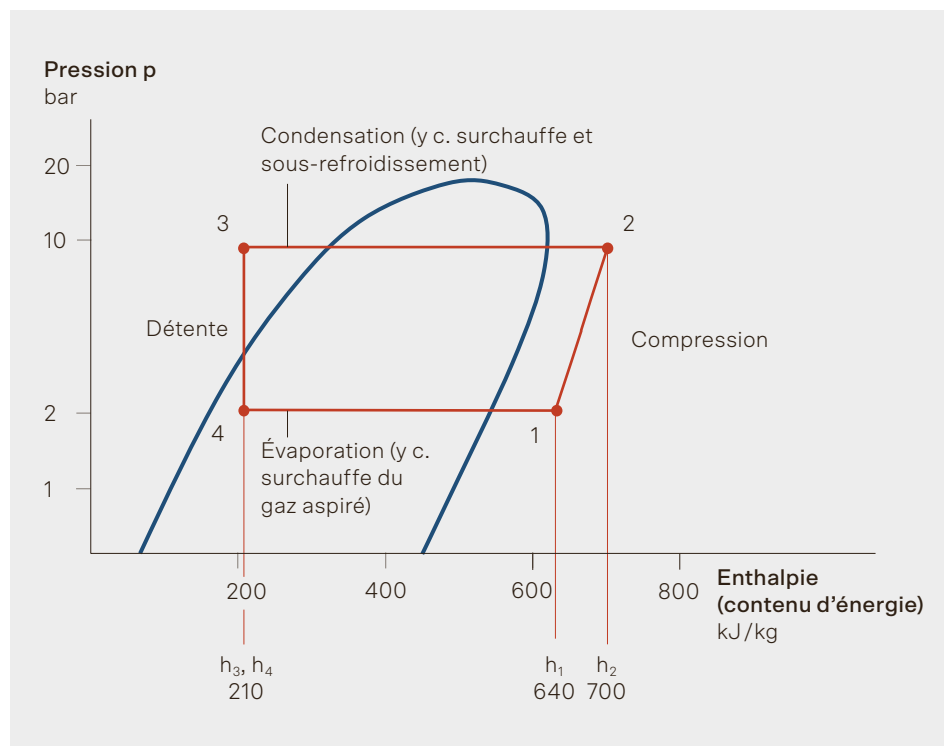


Illustration 3.7: Exemple d'un bilan de puissance sur l'ensemble de la machine. Calcul selon l'équation 3-5:  $(640-210 \text{ kJ/kg}) + (700-640 \text{ kJ/kg}) = 700-210 \text{ kJ/kg}$ .



Considérons maintenant un système partiel dont le point 1 est l'entrée et le point 2 la sortie (1-2). À partir de la quantité de chaleur  $q_{12}$  ou de travail  $w_{t1-2}$  en kJ/kg ainsi obtenue, on calcule une puissance en kW en la multipliant par le débit massique du fluide frigorigène  $\dot{m}$  (kg/s):

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m} q_{1-2}$$

$$P = \dot{m} w_{t1-2}$$

Un bilan peut également être établi sur un seul échangeur de chaleur. La quantité de chaleur spécifique transférée d'un côté de l'échangeur de chaleur est calculée à partir de la différence d'enthalpie du seul médium circulant.

$$q_{1-2} = h_2 - h_1$$

En supposant que la quantité totale d'énergie libérée d'un côté est également complètement absorbée par l'autre côté, les différences d'enthalpie du côté

du fluide frigorigène et du côté du fluide caloporteur d'un échangeur de chaleur peuvent être mises en équation. L'illustration 3.9 montre cette situation pour le condenseur (indice c).

La chaleur transférée peut être équilibrée. La méthode de calcul suivante s'applique:

Côté secondaire

$$\dot{Q}_{c\text{Fluide caloporteur}} = \dot{m}_W (h_{\text{HORS}} - h_{\text{EN}})$$

Côté primaire

$$\dot{Q}_{c\text{Fluide frigorigène}} = \dot{m}_K (h_{\text{F EN}} - h_{\text{F HORS}})$$

Bilan

$$\dot{Q}_{c\text{Fluide caloporteur}} = - \dot{Q}_{c\text{Fluide frigorigène}}$$

Il s'ensuit

$$(h_{\text{KEN}} - h_{\text{KHORS}}) = (h_{\text{AW}} - h_{\text{HC EN}}) \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_K}$$

Équation 3-6

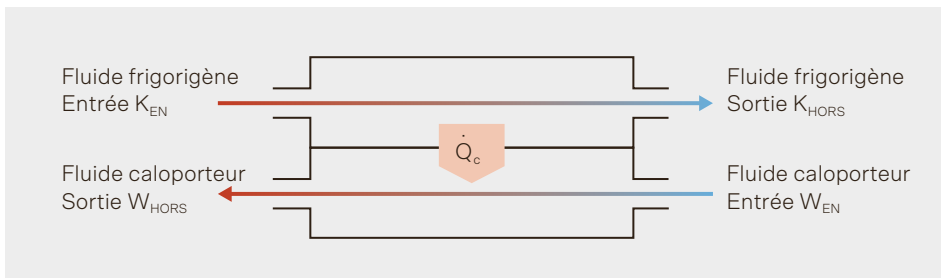
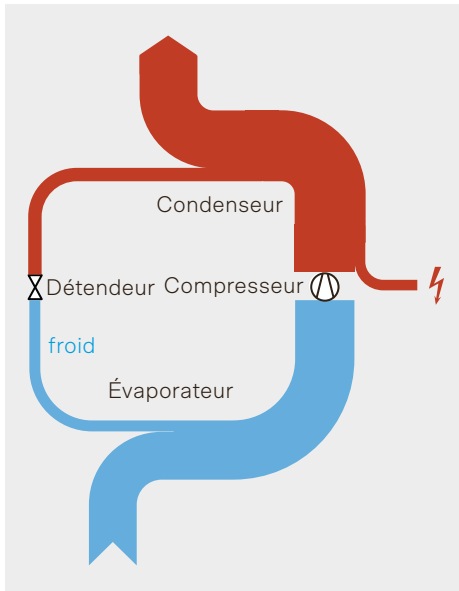
- $h_{\text{HC EN}}$  Enthalpie fluide caloporteur EN
- $h_{\text{AW}}$  Enthalpie fluide caloporteur HORS
- $\dot{m}_W$  Débit massique fluide caloporteur
- $h_{\text{KEN}}$  Enthalpie fluide frigorigène EN
- $h_{\text{KHORS}}$  Enthalpie fluide frigorigène HORS
- $\dot{m}_K$  Débit massique fluide frigorigène

L'illustration 3.9 montre les courbes de température correspondantes du fluide frigorigène et du médium caloporteur. On voit clairement que la condensation du fluide frigorigène crée une étape dans la progression et que le médium caloporteur sous forme liquide pure connaît une augmentation continue de la température.

Pour les zones individuelles où aucun changement d'état n'a lieu, une diffé-

Illustration 3.9: Représentation d'un fluide caloporteur à l'exemple d'un condenseur. Le fluide frigorigène (K) entre à  $K_{\text{EN}}$  et sort à  $K_{\text{HORS}}$ , le fluide caloporteur (W) entre à  $W_{\text{EN}}$  et sort à  $W_{\text{HORS}}$ . La chaleur dégagée par le fluide frigorigène est entièrement transférée au fluide caloporteur.

Illustration 3.8: Diagramme du flux d'énergie de la machine frigorifique à compression.





### 3.6 Sélection des fluides frigorigènes appropriés

Pour qu'une substance puisse être utilisée comme fluide frigorigène, elle doit être bien adaptée au processus de refroidissement (compression, condensation, détente, évaporation). Les premiers fluides frigorigènes étaient des substances présentes dans la nature – les fluides frigorigènes dits naturels. Ce sont, par exemple, le dioxyde de carbone, l'eau ou l'ammoniac.

Outre la maîtrise technique, l'étanchéité des installations était un problème. Certains des premiers fluides frigorigènes couramment utilisés au 19<sup>e</sup> et au début du 20<sup>e</sup> siècle étaient toxiques ou haute-

ment inflammables. Une fuite éventuelle du fluide frigorigène dans l'environnement représentait donc un danger (voir aussi Voyage dans le temps à travers la climatisation, page 7).

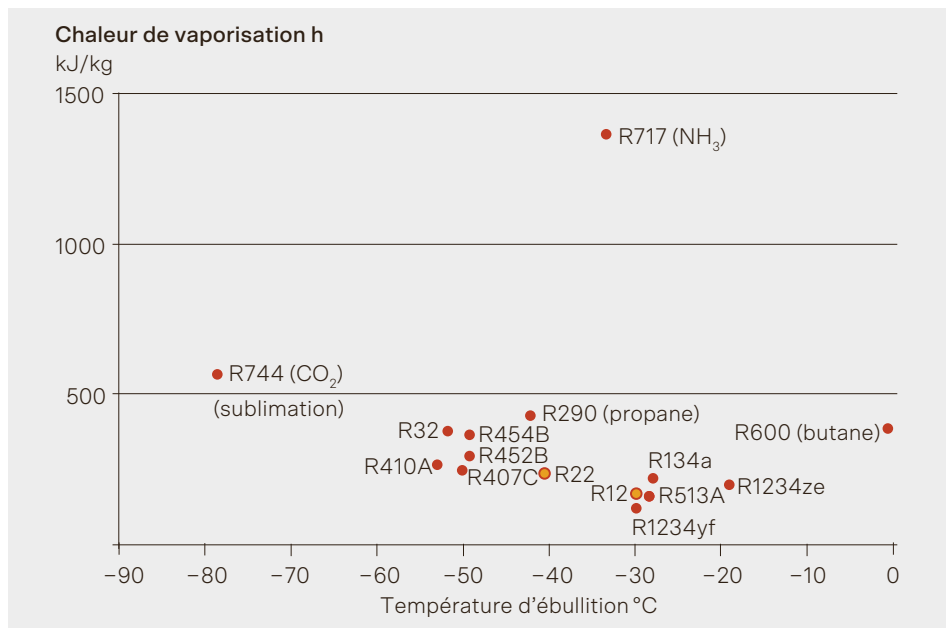
Cela a obligé à rechercher des fluides frigorigènes de sécurité produits artificiellement – les fluides frigorigènes dits synthétiques, qui ont été utilisés à partir de 1930. La toxicité et l'inflammabilité ont ainsi pu être évitées. Cependant, au fil du temps, d'autres problèmes sont apparus (voir ci-dessous: potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone ODP, Potentiel de Réchauffement Global PRG).

La norme SN-EN 378 définit et règle les exigences de sécurité et d'environnement pour les machines frigor-

Illustration 3.12:  
Exigences pour la sélection des fluides frigorigènes.

Propriétés	Souhait
<b>Thermophysique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enthalpie d'évaporation élevée</li> <li>- Pression de vapeur aux températures de travail à un niveau techniquement bien contrôlable</li> <li>- Faible viscosité</li> </ul>
<b>Chimique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance chimique et thermique</li> <li>- Bonne compatibilité des matériaux</li> <li>- Bonne compatibilité avec les huiles de machines</li> </ul>
<b>Écologique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP = 0)</li> <li>- Faible potentiel de réchauffement de la planète (PRG = 0, TEWI inférieur)</li> </ul>
<b>Physiologique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manipulation non dangereuse</li> </ul>
<b>Économique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute disponibilité</li> <li>- Faibles coûts</li> </ul>

Illustration 3.13:  
Chaleur de vaporisation et température d'ébullition des fluides frigorigènes à la pression ambiante  $p = 1,013 \text{ bar}$ .  
Noter que les fluides frigorigènes R12 et R22 sont interdits, mais ils sont encore fréquemment utilisés comme valeurs comparatives. C'est pourquoi ils sont également répertoriés ici.



riques. En outre, les lois environnementales locales doivent être respectées lors du choix des fluides frigorigènes.

Pour choisir un fluide frigorigène approprié, on évalue ses propriétés thermophysiques, chimiques, écologiques, physiologiques et économiques (Illustr. 3.12). Le choix d’un fluide frigorigène commence par la considération thermophysique de l’installation: quelle puissance frigorifique le système doit-il fournir à quelles températures sans que le volume de fluide frigorigène devienne trop important?

Ensuite, on vérifie quelles réglementations écologiques doivent être respectées et si cela est possible avec le fluide frigorigène. Pour le constructeur de machines, il est également important de savoir quels matériaux et quels joints doivent être choisis. Et quelle huile peut être utilisée pour lubrifier le compresseur si nécessaire (propriétés chimiques). L’huile et le fluide frigorigène limitent considérablement la plage de fonctionnement du côté haute pression de la machine, car ils ne peuvent être utilisés que jusqu’aux températures spécifiées par le fabricant.

Les propriétés physiologiques du fluide frigorigène se reflètent principalement dans les exigences de sécurité de la machine frigorifique. À cette fin, les fluides

frigorigènes sont répartis en classes selon leur toxicité et leur inflammabilité, et des mesures de sécurité correspondantes sont prescrites pour la construction des systèmes.

Le choix du fluide frigorigène est également basé sur des considérations économiques. Cela ne se limite pas au seul prix du fluide frigorigène et de la machine. L’accent est plutôt mis sur les coûts d’exploitation de la machine frigorifique. L’expérience montre qu’environ 80 % des coûts totaux d’une installation résultent de son exploitation (coûts énergétiques et maintenance).

### Propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques du fluide frigorigène influencent principalement la fabrication de la machine. L’illustration 3.14 montre l’enthalpie d’évaporation des fluides frigorigènes usuels selon leur température d’ébullition exprimée en pression relative. La température d’évaporation souhaitée  $T_0$  est obtenue en augmentant la pression du système dans la machine frigorifique.

La température de refroidissement d’environ 0 °C requise dans le domaine de la climatisation entraîne une plage de pression relativement facile à gérer, inférieure à 10 bars, pour les fluides frigorigènes les plus courants. L’utilisation du CO<sub>2</sub> comme

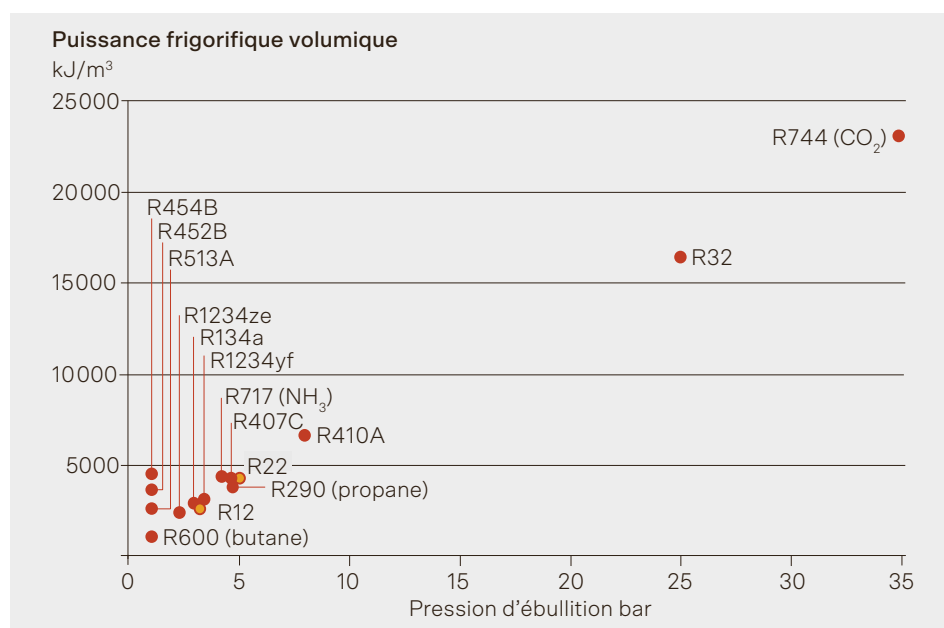


Illustration 3.14: Puissance frigorifique volumique maximale des différents fluides frigorigènes (valeur théorique avec  $(h^e - h^i)$  à 0 °C). La puissance frigorifique volumique du fluide frigorigène change en fonction des conditions de fonctionnement. Les valeurs courantes dans la pratique pour les installations de climatisation figurent dans l’Illustration 3.16.

fluide frigorigène conduit à des pressions nettement plus élevées (supérieures à environ 30 bars de pression d'évaporation  $p_0$ ) et exige donc du fabricant de la machine des connaissances particulières et la maîtrise des processus de fabrication correspondants.

L'ammoniac offre environ trois fois plus de chaleur de vaporisation que les autres fluides frigorigènes et permet donc des puissances de refroidissement plus élevées pour des débits massiques raisonnables du fluide frigorigène. En même temps, par rapport à d'autres fluides frigorigènes, la quantité de fluide peut être considérablement réduite dans les grandes installations. Il convient de noter que la densité du fluide frigorigène est prise en compte dans le calcul de la puissance de refroidissement (appelée puissance de refroidissement volumique, voir Illustr. 3.14).

Si l'on considère la puissance de refroidissement volumique à 0 °C, l'illustr. 3.14 montre le potentiel de chaleur de vaporisation de différents fluides frigorigènes en utilisant la chaleur de vaporisation complète. Le fluide frigorigène naturel CO<sub>2</sub> se distingue ici, bien qu'il nécessite des pressions d'exploitation plus élevées. En outre, la récupération de la chaleur est recommandée pour les installations à CO<sub>2</sub>.

### Propriétés physiologiques

La classification physiologique des fluides frigorigènes est basée sur leur inflammabilité et leur toxicité. Les normes applicables réglementent la manipulation selon les classes de l'illustration 3.15. En général, les fluides frigorigènes moins toxiques sont affectés à la classe A, et les plus toxiques à la classe B. L'inflammabilité est indiquée par un chiffre en

annexe et va de 1 (pas de propagation de la flamme) à 3 (hautement inflammable). La classification du fluide frigorigène détermine les mesures de sécurité à prendre lors de l'installation des machines frigorifiques. Les mesures sont réglementées dans la norme SN EN 378 et expliquées dans le chapitre sur la planification (voir Illustr. 4.3).

Une nouvelle classe 2L a été définie pour les nouveaux fluides frigorigènes HFO, car les HFO peuvent être inflammables dans certaines circonstances, mais leur vitesse de combustion reste faible. Dans la définition des mesures de sécurité lors de la manipulation du HFO, le planificateur d'installations frigorifiques doit s'orienter davantage sur l'ammoniac que sur le R134a, pour lequel le HFO est souvent utilisé comme fluide frigorigène de substitution.

### Propriétés écologiques

- **Appauvrissement de la couche d'ozone (ODP):** Les premiers fluides frigorigènes dits sûrs appartenaient au groupe des chlorofluorocarbures CFC. Ils sont non-toxiques et ininflammables. Cependant, ils ont un potentiel élevé d'appauvrissement de la couche d'ozone dans l'atmosphère.
- **Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone** d'un fluide frigorigène est appelé ODP (Ozone Depletion Potential). Plus la valeur ODP est élevée, plus le fluide frigorigène est nuisible à la couche d'ozone. Les fluides frigorigènes actuels n'ont pratiquement aucun potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone.
- **Potentiel de réchauffement global (PRG):** les fluides frigorigènes ont un potentiel d'effet de serre et contribuent donc au réchauffement de la planète. Le potentiel de réchauffement global correspondant d'un fluide frigorigène est indiqué par la valeur PRG (Global Warming Potential). La valeur PRG du fluide frigorigène est liée au CO<sub>2</sub> (PRG = 1), qui est principalement responsable du réchauffement climatique en termes de quantité.

Illustration 3.15:  
Les différentes classes de fluides frigorigènes en fonction de leur toxicité et de leur inflammabilité.

inflammable	toxique	
	moins	plus
fort	A3	B3
faible	A2	B2
à peine	A2L	B2L
non (pas de propagation de flammes)	A1	B1

D'un point de vue environnemental, la valeur du PRG d'un fluide frigorigène est au premier plan. Plus le PRG est élevé, plus la contribution du fluide frigorigène au réchauffement global est importante lorsqu'il est libéré. Il convient de noter: le fluide frigorigène naturel CO<sub>2</sub> n'est pas produit artificiellement, mais est déjà présent dans l'environnement. Il peut donc être évalué de manière neutre quant à son impact sur l'atmosphère.

### 3.7 Évaluation du TEWI

La valeur TEWI (Total Equivalent Warming Impact) a été définie pour calculer les propriétés écologiques d'une installation de climatisation sur toute sa durée de vie. D'une part, elle prend en compte l'impact environnemental indirect, qui est évalué à partir du besoin énergétique annuel d'un système (consommation d'électricité et émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes). À cela s'ajoute la contribution directe des gaz à effet de serre due à la libération du fluide frigorigène utilisé. La contribution directe tient compte du remplacement du fluide frigorigène en cas de fuite et du taux de recyclage lors de la déconstruction de l'installation. La valeur TEWI représente donc la quantité équivalente de CO<sub>2</sub> libérée pendant la durée de vie d'un système. Le TEWI est calculé comme suit:

$$\text{TEWI} = \text{PRG}_{\text{Exploitation}} + \text{PRG}_{\text{Fuite}} + \text{PRG}_{\text{Déconstruction}}$$

La part indirecte (émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation d'électricité) est enregistrée

$$\text{PRG}_{\text{Exploitation}} = n E b$$

n Durée de vie de l'installation (années)  
 E Besoin en énergie de l'installation (kWh/an)  
 b Teneur en CO<sub>2</sub> du mix d'électricité utilisé (kg CO<sub>2</sub>/kWh)  
 et les parts directes dues à la quantité de remplissage due aux fuites moins le fluide frigorigène retourné lorsque l'installation est démolie:

$$\text{PRG}_{\text{Fuite}} = \text{PRG}_{\text{Fluide frigorigène}} L n$$

PRG<sub>Fluide frigorigène</sub> PRG du fluide frigorigène  
 L Taux de fuite (kg/an)  
 n Durée de vie de l'installation (années)

$$\text{PRG}_{\text{Déconstruction}} = \text{PRG}_{\text{Fluide frigorigène}} m (1-a)$$

PRG<sub>Fluide frigorigène</sub> PRG du fluide frigorigène  
 m Quantité de remplissage de fluide frigorigène dans l'installation (kg)  
 a Part du fluide frigorigène restituée pour le recyclage (%)

### 3.8 Fluides frigorigènes dans la climatisation

#### Fluides frigorigènes naturels

Les fluides frigorigènes naturels suivants sont largement utilisés dans le domaine de la climatisation:

- R717 Ammoniac NH<sub>3</sub>
- R290 Propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>
- R744 Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>

Les fluides frigorigènes naturels ont un PRG très faible. Ils sont prélevés dans l'environnement et y retournent lorsqu'il y a des fuites dans la machine. Toutefois, en raison de leurs propriétés chimiques, des mesures de sécurité complexes doivent être prises dans certains cas.

#### Fluides frigorigènes synthétiques, stables dans l'air

Les fluides frigorigènes synthétiques suivants sont largement utilisés dans le domaine de la climatisation:

- R32
- R452B
- R454B
- R513A

La mise en circulation d'installations utilisant les fluides frigorigènes suivants est susceptible d'être davantage restreinte. En outre, la disponibilité est incertaine à l'avenir.

- R134a
- R407C

Les fluides frigorigènes R407C et 513A sont des mélanges basés sur le fluide R32. Pendant l'évaporation, ils ont tendance à se séparer. Cela a pour conséquence que la température d'évaporation augmente avec la teneur en gaz. Dans ce contexte, on parle de ce qu'on appelle le glissement de température, qui est d'environ 7 K pour le R407C, par exemple. Les mélanges présentant cette propriété sont appelés mélanges zéotropiques.

Dans le cas du 513A, il se comporte de manière presque azéotropique (comme une substance pure), un comportement à peine visible.

On parle de plus en plus du R32 comme d'un fluide frigorigène pur, bien qu'il présente une certaine inflammabilité (classe A2L). Il est utilisé de façon croissante dans les machines frigorifiques, notamment pour les petites puissances de refroidissement.

#### Base de données PRG

Le potentiel de réchauffement global (PRG) d'un fluide frigorigène est déterminé, entre autres, par le temps de séjour dans l'atmosphère et le forçage radiatif. Les connaissances du temps de résidence et du forçage radiatif sont constamment améliorées. C'est pourquoi le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) actualise régulièrement les valeurs du potentiel de réchauffement global dans ses rapports.

Les valeurs du PRG figurant dans le présent ouvrage technique se fondent sur la «Vue d'ensemble des principaux fluides frigorigènes» de l'OFEV de septembre 2020. Dans ce document, le potentiel de réchauffement global PRG est considéré sur un horizon temporel de 100 ans. Les valeurs numériques pour les CFC, HCFC, HFC/HFC et les fluides frigorigènes naturels sont basés sur le GIEC (2007), les valeurs numériques pour le HCFO sont basées sur les valeurs de l'Organisation météorologique mondiale OMM (2018) et les valeurs numériques pour le HFO sont basées sur le GIEC (2014).

#### Fluides frigorigènes non stables dans l'air

Les HFO (hydrofluoro-oléfines) sont des fluides frigorigènes synthétiques non stables dans l'air. Dans le domaine du froid de confort, les HFO suivants sont actuellement de plus en plus utilisés:

- R1234yf (PRG = 1)
- R1234ze (PRG = 1)

Les HFO sont appelés fluides frigorigènes de 4<sup>e</sup> génération et ont été développés dans l'optique d'un faible PRG. Avec 1, cela représente une fraction du PRG d'autres fluides frigorigènes synthétiques couramment utilisés. Les HFO se rapprochent du PRG des fluides frigorigènes naturels (CO<sub>2</sub> = 1; ammoniac = 0; propane = 3). En raison des propriétés chimiques du HFO, des mesures de sécurité doivent également être prises lors de l'installation. Ils sont affectés à la classe de sécurité A2L car ils ont une vitesse de combustion lente. La conception des installations est donc plus proche de celle des installations à l'ammoniac que de celle des installations au R134a. Des produits de réaction acides peuvent apparaître au cours de la réaction chimique. Les HFO sont stables dans l'air pendant environ 10 jours puis se désintègrent. Les produits de réaction de la désintégration peuvent être détectés dans l'atmosphère. Leurs effets à long terme – notamment en ce qui concerne la formation d'acide trifluoroacétique (TFA) en cas de dégradation et les précipitations acides qui en résultent – ne sont pas encore clairs et font l'objet d'une surveillance étroite afin de s'assurer qu'aucun dommage environnemental à long terme n'en résulte.

La manipulation professionnelle ou commerciale des fluides frigorigènes nécessite un permis spécial.

### Les principaux fluides frigorigènes dans le domaine du froid de climatisation

Fluides frigorigènes	PRG [1]	Puissance frigorigène rapportée au débit volumique kJ/m <sup>3</sup> [2]	Plage de température d'une utilisation économique des rejets thermiques °C [3]	Valeur limite pratique kg/m <sup>3</sup> [4]	Classe de sécurité (p. 16) [5]	Toxicité (ATEL/ODL) [6]	Inflammabilité (LIE) [7]
Fluides frigorigènes synthétiques, stables dans l'air							
R32	675	5300	35 – 45 (max. 55)	0,061	A2L	faiblement toxique	faiblement inflamm.
R134a [9]	1430	2050	30 – 40 (max. 75)	0,25	A1	faibl. toxique	non inflamm.
R410A [9]	2090	4600	30 – 40 (max. 55)	0,44	A1	faibl. toxique	non inflamm.
R452B	698	4400	30 – 40 (max. 55)	0,062	A2L	faibl. toxique	faiblement inflamm.
R454B	466	4500	30 – 40 (max. 55)	0,039	A2L	faibl. toxique	faiblement inflamm.
R513A	631	2050	30 – 40 (max. 75)	0,35	A1	faibl. toxique	non inflamm.
Fluides frigorigènes synthétiques, non stables dans l'air							
R1234ze	< 1	1550	30 – 40 (max. 85)	0,061	A2L	faibl. toxique	faiblement inflamm.
R1234yf	< 1	1900	30 – 40 (max. 75)	0,058	A2L	faibl. toxique	faiblement inflamm.
Fluides frigorigènes naturels							
R290 Propane	3	2750	30 – 40 (max. 60)	0,008	A3	faibl. toxique	hautement inflamm.
R717 Ammoniac NH <sub>3</sub>	0	3650	30 – 40 (max. 90)	0,00035	B2L	hautement toxique	faiblement inflamm.
R1270 Propène (propylène)	3	3350	30 – 40 (max. 55)	0,008	A3	faibl. toxique	hautement inflamm.
R744 CO <sub>2</sub>	1	8500	30 – 60 (max. 90) [8]	0,1	A1	faibl. toxique	non inflamm.

[1] PRG = Potential de réchauffement global (potential d'effet de serre), source: IPCC IV, 2007 et IPCC V, 2014 (pour HFO)

[2] Valeurs valables pour t<sub>0</sub> = 0 °C, t<sub>c</sub> = 40 °C

[3] Valeurs indicatives des températures de la chaleur rejetée pour lesquelles l'énergie thermique peut être découplée à un prix de la chaleur inférieur à 2 ct./kWh. Selon le type de compresseur et le concept de l'installation, la chaleur rejetée utilisable est également possible à des températures plus élevées. La température maximale du fluide frigorigène correspondant se situe dans la plage des valeurs mentionnées entre parenthèses. Dans tous les cas, il convient de tenir compte de l'économicité (surcoût et rendement supérieur). Un désurchauffeur permet d'utiliser env. 10 à 15 % de la puissance du condenseur – sans élévation de la température de condensation. Cette chaleur rejetée est «gratuite» (voir aussi: Document de base concernant la garantie de performance des installations frigorifiques, page 3: Utilisation de la chaleur rejetée, SuisseEnergie/ASF 2015).

[4] La valeur limite pratique permet de calculer la concentration maximale dans un espace occupé. Selon la valeur la plus élevée, la toxicité ou l'inflammabilité influence la valeur limite pratique (voir annexe C, SN EN 378-1). En présence de pres-

criptions nationales ou régionales plus restrictives, celles-ci ont la priorité sur les exigences de la norme concernant ces valeurs limites.

[5] Voir aussi «Mesures de construction» (page 16 et suivantes)

[6] Légère adaptation linguistique pour une meilleure compréhension. Les termes utilisés correspondent à la terminologie de la norme SN EN 387-1, annexe E, comme suit:

■ faiblement toxique = classe A (faible toxicité)

■ hautement toxique = classe B (haute toxicité)

[7] Légère adaptation linguistique pour une meilleure compréhension. Les termes utilisés correspondent à la terminologie de la norme SN EN 387-1, annexe E, comme suit:

■ non inflammable = classe 1

■ faiblement inflammable = classe 2L

■ inflammable = classe 2

■ hautement inflammable = classe 3

[8] Pour le CO<sub>2</sub>, la température de retour (température d'entrée dans le refroidisseur à gaz/condenseur) est déterminante. Celle-ci doit être la plus basse possible (règle d'or: toujours inférieure à 35 °C).

[9] Fluides frigorigènes qui seront interdits dans un avenir proche et dont la disponibilité future est incertaine.

Illustration 3.16: Principaux fluides frigorigènes dans le domaine du froid de climatisation. (Guide des fluides frigorigènes, SuisseEnergie 10/2020)



## 10 points relatifs aux bases de la climatisation

1. Le cycle est la clé de la compréhension de la machine frigorifique.
2. Dans ce cycle, le fluide frigorigène passe par quatre phases:
  - La pression du fluide frigorigène est augmentée par le compresseur et il se réchauffe.
  - Il libère la chaleur dans le condenseur.
  - Il est détendu dans le détendeur et se refroidit ainsi.
  - Il s'évapore ensuite dans l'évaporateur et absorbe de la chaleur au cours du processus.
3. Le diagramme log p,h permet de représenter aisément les énergies converties (différences d'enthalpie).
4. Le cycle de Carnot est absolument le meilleur cycle pouvant être mis en œuvre. Les processus cycliques réels ne peuvent jamais l'atteindre, mais avec son aide, le processus cyclique réel peut être optimisé.
5. Plus les températures d'évaporation et de condensation sont proches, plus le cycle est efficace. Cela s'applique également à l'augmentation des températures d'évaporation.
6. Chaque fluide frigorigène présente des avantages et des inconvénients. Pour choisir un fluide frigorigène approprié, on évalue ses propriétés thermophysiques, chimiques, écologiques, physiologiques et économiques.
7. Le fluide frigorigène a une grande influence sur l'emplacement de la machine frigorifique et les exigences de sécurité requises.
8. Lorsque des fluides frigorigènes sont libérés, ils peuvent être nocifs pour le climat, toxiques, former des acides ou appauvrir la couche d'ozone.
9. Une fois libérés, les fluides frigorigènes naturels et les HFO ont un très faible potentiel de réchauffement global.
10. L'utilisation des fluides frigorigènes est réglementée par la loi. Un permis professionnel est nécessaire pour manipuler les fluides frigorigènes.

# Le processus de planification

**Une fonctionnalité et un confort élevés pour les utilisateurs, la qualité du design et la conservation de la valeur – tels sont les objectifs de la planification d'un bâtiment orienté vers la durabilité et l'économie globale. C'est pourquoi, dès la phase de concours, il est nécessaire de mettre en place une planification de la construction réunissant et intégrant toutes les compétences spécialisées: de la conception architecturale d'ensemble à l'ingénierie des structures, de la physique et des techniques du bâtiment.**

## 4.1 Exigences générales

Pour une construction respectueuse du climat, les surfaces vitrées, les protections contre le rayonnement, les ombrages alternatifs doivent être coordonnés intelligemment avec le refroidissement, le chauffage et la gestion technique des bâtiments.

## 4.2 Facteurs d'influence

### Les températures sont déterminantes pour l'économie d'énergie

La différence entre la température de condensation et d'évaporation est déterminante pour l'efficacité d'un compresseur. Plus la différence de température est faible, plus le compresseur fonctionne de manière efficace et économique. Pour y parvenir, il faut viser une température de condensation basse du côté chaud et une température d'évaporation élevée du côté froid.

Dans le cadre d'un projet donné, les températures des médiums (refroidissement et chauffage) doivent être définies en priorité. Dans la plupart des cas, ces températures sont déterminées par le refroidissement, le chauffage et la température nécessaires pour la production d'eau chaude sanitaire. Les conditions-cadres suivantes doivent être respectées:

- Les températures du médium frigoporteur sont définies par le processus et la norme SIA 382/1 (2014), spécifiant les températures du fluide pour des raisons énergétiques. Elles se situent strictement entre 6 et 14 °C.
- La température du médium caloporteur est liée à la température ambiante d'été dans le cas d'un post-refroidissement en toiture (éventuellement réduite par des effets adiabatiques, comme lors d'une pulvérisation d'eau). Selon la norme SIA 2028, la température de dimensionnement pour Zurich-Kloten est de 32,9 °C p. ex.
- La protection contre les légionelles dans l'eau chaude sanitaire doit être respectée en conséquence.

### Interpréter correctement les températures du fluide frigoporteur de la norme SIA 382/1 (2014)

Pour un immeuble commercial typique ou même un hôpital du Plateau suisse, il n'est pas absolument nécessaire de prévoir une température de départ du fluide frigoporteur selon la norme SIA 382/1 (2014) d'exactly 10 °C. L'exemple suivant montre comment des températures optimisées, même plus élevées, peuvent conduire à de bonnes solutions.

Lorsque la température du fluide frigoporteur est définie avec une température de départ de 12 °C (au lieu de 10 °C selon la norme SIA), cela permet d'obtenir un point de rosée de l'air soufflé de 14 °C. Ainsi, une température de départ du fluide frigoporteur de 14 °C peut être assurée pour les plafonds rafraîchissants par une régulation de la température de départ sur le groupe. Il faut s'attendre à ce que, en raison des «pertes de froid» (apports d'énergie) au «point d'utilisation», les températures du médium frigoporteur soient encore supérieures de 1 à 2 K, ce qui permet d'éviter la formation de condensat sur les surfaces de refroidissement et dans les aëroréfrigérants à air recyclé.

Une température de retour du médium frigoporteur de 18 à 20 °C ( $\Delta T$  env. 3 à 4 K dans le plafond rafraîchissant) permet d'obtenir des débits volumiques significatifs et assure des différences de température moyenne optimales dans les plafonds rafraîchissants, soit des conditions ambiantes d'environ 24 °C et 55 à 60 % d'humidité relative, avec des performances raisonnables et économiques par unité de surface. Lorsqu'il faut garantir un refroidissement sans condensation, il y a lieu d'installer un contrôle du point de rosée de l'air soufflé ou de l'air extrait, en cas d'émission d'humidité dans le local. Pour cela, il faut mesurer la température et l'humidité, et en déduire le point de rosée. Si celui-ci est supérieur à la température de dimensionnement, une routine programmée peut être utilisée pour augmenter l'air d'alimentation du groupe en conséquence et garantir l'absence de condensat. Bien que cela réduise temporairement la puissance du plafond rafraîchissant, la puissance de refroidissement est maintenue – pour une température ambiante augmentée – à la même valeur.

Lorsqu'un point de rosée plus bas de l'air soufflé est nécessaire, seul le débit volumique d'air soufflé absolument minimal nécessaire doit être traité en plus avec une petite machine frigorifique, éventuellement à évaporation directe. Celle-ci peut être refroidie de manière optimale dans le réseau de médium frigoporteur à 12 °C. Il en résulte un très bon coefficient

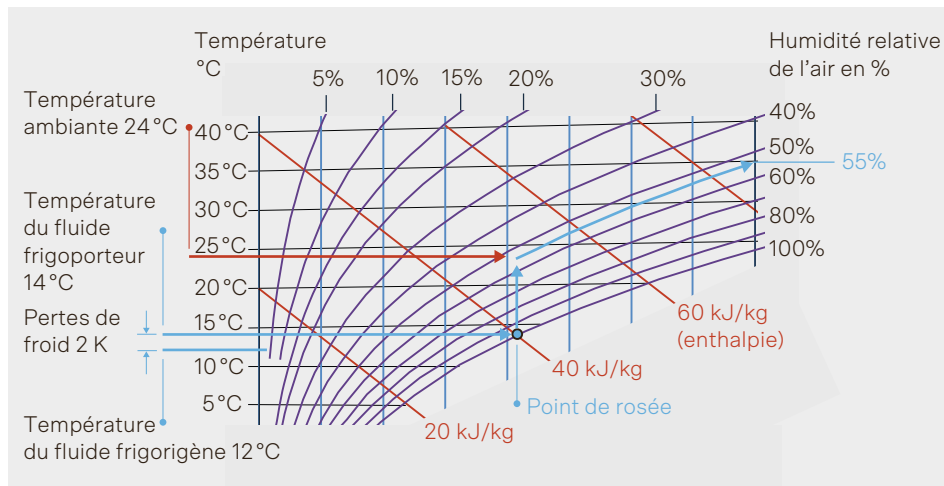
de performance ( $COP_{\text{Froid}}$ ) et l'apport énergétique est minimisé.

Une température du médium caloporteur de 38–32 °C est la contrepartie du refroidissement. Ces températures peuvent également être maintenues à des températures extérieures plus élevées avec des aéroréfrigérants hybrides, garantissent un coefficient de performance optimal ( $COP_{\text{Froid}}$ ) de la machine frigorifique-thermique et sont bien adaptées au chauffage de surface (plafonds chauffants-rafraîchissants et chauffage par le sol), aux unités à transfert de chaleur forcé (unités de recirculation, ventilo-convecteurs, convecteurs actifs avec ventilateurs, réchauffeurs d'air soufflé) ainsi qu'au préchauffage de l'eau sanitaire via des échangeurs à plaques (système de charge). Une petite pompe à chaleur adaptée (propane,  $CO_2$ ) peut être utilisée pour réchauffer l'eau chaude sanitaire. Cela permet d'exploiter au mieux l'énergie du réseau du médium caloporteur. En raison de la température élevée de la source d'énergie, cette pompe à chaleur fonctionne très efficacement et présente donc un très bon coefficient de performance.

### Fiabilité et disponibilité opérationnelles élevées

La disponibilité du système de refroidissement ou de chauffage et de ses composants est définie comme le pourcentage du temps de fonctionnement pendant lequel ce système ou ce composant

Illustration 4.1:  
Le diagramme de Mollier (diagramme hx) montre que lorsque de l'air à 14 °C est chauffé à 24 °C au point de rosée, l'humidité relative de l'air fourni est d'environ 55%. Une humidité ambiante de 60% h.r. peut être assurée malgré la pénétration d'humidité dans la pièce.



fonctionne sans erreur – le temps de fonctionnement étant généralement lié à la saison. Les systèmes informatiques et de traitement, les appareils médicaux, mais aussi les équipements de sécurité et les systèmes d’analyse dans les laboratoires dépendent du refroidissement et donc de la disponibilité de la machine frigorifique ou du système de refroidissement et éventuellement de chauffage. Une disponibilité ou un temps moyen entre défaillances (MTBF, Mean Time Between Failure, Temps moyen entre défaillances) de 99,9% sont souvent exigés, ce qui correspond à une défaillance maximale du système d’un peu moins de dix heures par an (8760 h fois 0,001). Le temps moyen de réparation (MTTR, Mean Time to Repair, Temps moyen de réparation) définit la durée moyenne d’indisponibilité ou maximale d’interruption admissible d’un système (RTO, Recovery Time Objective, Durée maximale d’interruption admissible).

Souvent, seule la production est examinée de près dans l’évaluation des risques. Cependant, la disponibilité est une exigence pour l’ensemble du système et tous les composants doivent être pris en compte. La production de froid ne remplira pas son rôle si le post-refroidissement ne fonctionne pas, si une pompe tombe en panne ou si un utilisateur modifie par inadvertance un point de consigne de manière incorrecte via le système de contrôle. Dans la perspective du système global, une évaluation individuelle des

risques doit être effectuée pour chaque composant. Pour les composants critiques tels que les générateurs, les pompes, les commandes de vannes et autres éléments soumis à l’usure, il faut éviter qu’un point de défaillance unique (SPOF) se produise, c’est-à-dire que la défaillance du composant entraîne celle de l’ensemble du système.

Les composants identifiés comme critiques doivent être sécurisés par des mesures conceptuelles. La méthode (n+1) est généralement choisie pour cela. Lorsque n = 1 est défini, deux composants ayant chacun une capacité de 100% sont utilisés. Si, par exemple, on choisit n = 3, quatre composants sont installés à 33% en branchement parallèle. Grâce à ce concept de redondance, un composant peut donc tomber en panne et la capacité totale reste disponible. (voir également Chap. 2.5).

Dans ce cas, des mesures appropriées doivent être prises pour que la commutation ou le changement de séquence de priorité soit effectué automatiquement par la gestion technique du bâtiment. Lorsqu’une durée maximale d’interruption admissible (RTO, Recovery Time Objective) doit être respectée, une commutation manuelle n’est possible que dans de rares cas (service de garde, service de nuit, service de week-end).

Il doit être possible de remplacer chaque composant critique en cours d’exploitation sans interruption, c’est-à-dire sans altérer les performances du système. En

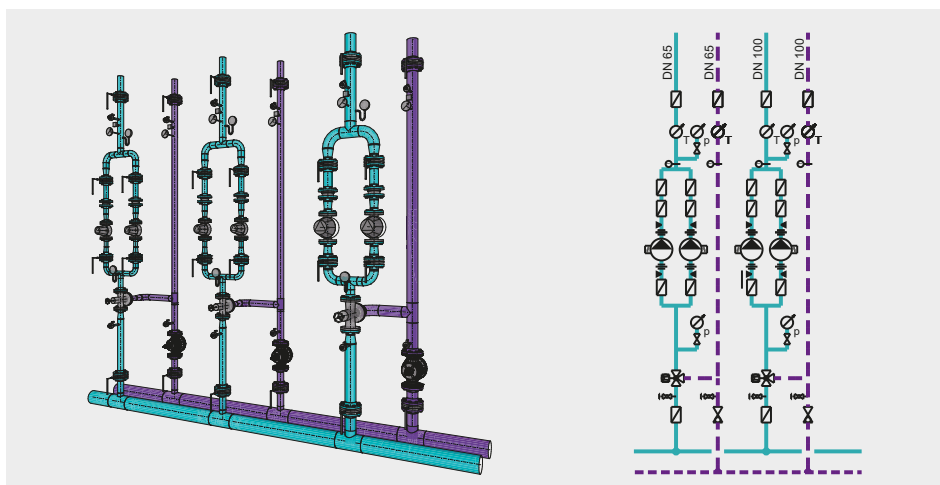


Illustration 4.2: Distributeur de froid avec pompes de groupe disposées de manière redondante et limiteurs de débit volumique disposés dans le retour. Les composants doivent être installés de manière à ce que les pompes puissent être remplacées pendant le fonctionnement.

plus du concept (n+1), cela nécessite également un certain équipement des composants. Par exemple, il doit être possible d'isoler une pompe redondante du réseau au moyen de clapets, le médium (eau) étant évacué de l'unité d'alimentation isolée au moyen de robinets de purge et de vidange. Dès lors, la pompe peut être remplacée, le clapet anti-retour contrôlé, puis le bloc d'alimentation rempli et purgé. Avant de rebrancher la pompe au réseau, il faut tester son fonctionnement (différents états, programmation spéciale, messages du système etc.), la protection de la pompe étant éventuellement activée.

#### Redondance et maintenance

La redondance résulte en un plus grand nombre d'installations et se traduit par un plus grand nombre de sources d'erreurs potentielles et de composants défaillants que dans un système unique. Bien que les composants des systèmes redondants soient plus susceptibles de tomber en panne, la disponibilité globale du système reste plus élevée. Toutefois, cette plus grande disponibilité se fait au prix de coûts d'investissement, de maintenance et de gestion nettement plus élevés.

#### Installations électriques dans les locaux dans lesquels des fluides frigorigènes inflammables A2L sont utilisés

Il convient de garantir qu'en cas de sortie du fluide frigorigène l'installation électrique dans le local est mise hors tension. Pour les installations conçues

##### conformément à SN EN 378:

dès que la concentration des fluides frigorigènes dépasse de 25 % la limite d'explosion inférieure (valeur LIE) dans le local, l'installation électrique doit être mise hors tension.

##### conformément au Feuille technique SUVA 66139:

dès que la concentration des fluides frigorigènes dépasse de 20 % la limite d'explosion inférieure (valeur LIE) dans le local, l'installation électrique doit être mise hors tension.

Les éléments électriques qui restent sous tension (p. ex. éclairage de secours ou ventilateurs) doivent être protégés contre l'explosion. Il faut en tenir compte aussi en particulier en cas de climatisation de chambres d'hôtel directement refroidies avec des installations VRV-DRV avec des fluides frigorigènes inflammables.

La défaillance d'un seul composant dans un système redondant ne signifie pas par définition la défaillance du système. Toutefois, l'exploitant du système doit être en mesure de rétablir la redondance dans un délai raisonnable. Pour que cela puisse se faire sans défaillance du système, il faut que le matériel de remplacement et le savoir-faire pour remplacer les composants soient disponibles ou qu'ils le soient dans le délai convenu. Néanmoins, il est possible que le rétablissement de la redondance nécessite une interruption des opérations. Dans ce cas, l'exploitant doit programmer les travaux dans une fenêtre de maintenance planifiée.

#### Installation et accessibilité

Les exigences relatives à la centrale de refroidissement/chauffage en matière d'emplacement, de protection, de ventilation, de bruit, d'accessibilité etc. peuvent être extrêmement complexes, surtout pour les systèmes de grande taille.<sup>1</sup>

Les exigences de sécurité dépendent du type et de la quantité de remplissage du fluide frigorigène.

En fonction de la classe de sécurité, différentes mesures sont nécessaires.<sup>2</sup>

Selon l'emplacement des composants frigorifiques, la norme SN EN 378-3 requiert différentes mesures de sécurité. À cet égard, on distingue les emplacements suivants:

1. À l'air libre
2. Dans une salle des machines
3. Dans un espace occupé
4. Dans un espace inoccupé non affecté comme salle des machines
5. Dans une enceinte ventilée

<sup>1</sup> Les principales influences proviennent de la directive SN EN 378 Installations frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences en matière de sécurité et d'environnement, parties 1 à 3, ainsi que des directives de protection contre l'incendie de l'AEA pour les installations thermiques (24-12d).

<sup>2</sup> Les détails sur les mesures de construction sont décrits dans la norme SN EN 378-1 à 3 et dans l'Aide à l'exécution de l'ORRChim, point 4.4.3.

### Les principales mesures de construction concernant les fluides frigorigènes des classes A1 et A2L sont décrites ci-après.<sup>1</sup>

#### Air et ventilation

Il doit y avoir au minimum 4 renouvellements d'air par heure lorsque la salle des machines est occupée (5.13.2)

Une ventilation mécanique d'urgence est nécessaire lorsque la concentration en fluide frigorigène de la classe de sécurité A1 dépasse soit la valeur limite pratique, soit la limite de toxicité. (5.13)

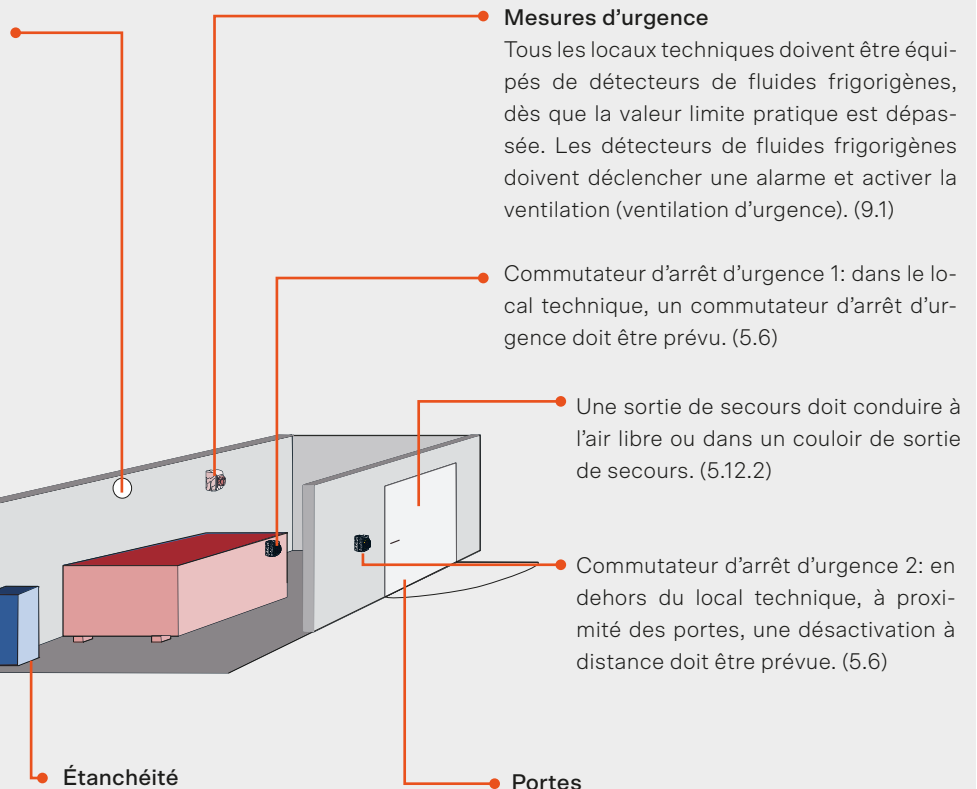
Pour les fluides frigorigènes de la classe de sécurité A2L, il convient en outre d'estimer la limite inférieure d'explosivité (LIE). (5.14)

Si du fluide frigorigène s'échappe, il convient de s'assurer qu'il sera évacué à l'air libre. (5.13.1)

Si d'autres machines (chaudières, compresseurs d'air comprimé etc.) se trouvent dans le même local technique, celles-ci ne doivent laisser pénétrer aucun gaz réfrigérant. L'air doit être acheminé depuis l'extérieur via un système de gaine approprié. (5.3)

#### Remarque relative à l'alarme incendie

Les alarmes incendie ne doivent pas réagir aux vapeurs des fluides frigorigènes. La priorité de l'ordre d'activation de la ventilation doit être définie avec les autorités compétentes ou l'assurance du bâtiment.



#### Mesures d'urgence

Tous les locaux techniques doivent être équipés de détecteurs de fluides frigorigènes, dès que la valeur limite pratique est dépassée. Les détecteurs de fluides frigorigènes doivent déclencher une alarme et activer la ventilation (ventilation d'urgence). (9.1)

Commutateur d'arrêt d'urgence 1: dans le local technique, un commutateur d'arrêt d'urgence doit être prévu. (5.6)

Une sortie de secours doit conduire à l'air libre ou dans un couloir de sortie de secours. (5.12.2)

Commutateur d'arrêt d'urgence 2: en dehors du local technique, à proximité des portes, une désactivation à distance doit être prévue. (5.6)

#### Étanchéité

Tous les points au niveau desquels les conduites et les canaux de ventilation passent à travers des murs, plafonds et planchers doivent être étanchéifiés. (5.8)

Les locaux techniques doivent être étanches («étanches à la fumée»). Le fluide frigorigène qui s'échappe ne doit pas pouvoir s'infiltrer dans d'autres locaux. (5.2)

#### Murs, sols, plafonds

Les murs, sols et plafonds doivent être conçus de façon à résister au feu pendant au moins 1 heure (EI60).

#### Portes

Les portes doivent s'ouvrir vers l'extérieur et avoir une résistance au feu de 30 minutes (EI30). (CFST 6517 et AEA1 24-15)

Si la quantité de remplissage du fluide frigorigène de la classe de sécurité A2L dépasse la valeur limite pratique autorisée ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), le local doit avoir une porte

- donnant directement à l'air libre ou
- donnant dans un local intermédiaire ayant une porte étanche à fermeture automatique.

Le local intermédiaire doit à son tour avoir une porte menant à l'air libre.

(selon SN EN 378, Partie 1, 5.14.5)

<sup>1</sup> En cas de doute, il convient de toujours faire appel aux textes originaux correspondants de la norme SN EN 378 ou du Feuillet technique SUVA 66139.

#### Lieu d'installation à l'air libre

- Dans le cas d'une fuite, le fluide frigorigène ne doit pas s'infiltrer dans les écoulements d'eau, les ouvertures de ventilation. (p. ex. gaine d'amenée d'air) via des portes ou des ouvertures de toit. (4.2)
- Si du fluide frigorigène échappé s'accumule (p. ex. placement dans une cavité accessible), il y a lieu de respecter d'autres exigences telles que ventilation, détecteurs de gaz etc. (4.2)
- Une surveillance technique avec dispositif automatique d'alarme est nécessaire pour les installations contenant plus de 25 kg de fluides frigorigènes (avec fluides frigorigènes stables dans l'air) (OFEV, Aide à l'exécution 4.4.3)

Illustration 4.3: Les principes de sécurité les plus importants à respecter lors de la construction d'un système avec un fluide frigorigène stable dans l'air des classes A1 et A2L. (Source: Guide des fluides frigorigènes, OFEN, 10/2020)

### **Production frigorifique dans une enceinte non accessible**

Lorsque les composants frigorifiques sont installés dans une enceinte non accessible, il convient de noter que celle-ci peut être ouverte pendant le travail et que le fluide frigorigène peut s'échapper dans l'espace environnant. En matière de sécurité, la norme SN EN 378 fait la différence entre:

#### **1. Enceinte sans ventilation**

Dans les installations contenant des fluides frigorigènes A1, la quantité maximale autorisée (toxicité), évaluée conformément à la classe d'emplacement où est disposé l'enceinte, ne doit pas être dépassée.

#### **2. Enceinte ventilée**

Les installations contenant un fluide frigorigène inflammable (p.ex. A2L) dans une enceinte ventilée doivent être évacués à l'extérieur. Lorsque des enceintes ventilées sont installées dans un local technique, les exigences relatives à la ventilation du local de machines doivent être respectées (SN EN 378-3, points 4.3 et 5). Lorsque l'enceinte est installée dans une zone où séjournent des personnes (espace occupé), elle ne peut être utilisée que si la quantité de remplissage maximale admissible n'est pas dépassée et si les exigences en matière de ventilation sont respectées (SN EN 378-3, point 4.6 et SN EN 378-2, points 6.2.15 et 6.2.14).

### **Les principes de sécurité d'une salle des machines**

Les mesures les plus importantes pour les fluides frigorigènes des classes A1 et A2L sont présentées à l'illustration 4.3. Les passages pertinents de la norme SN EN 378-3 sont également mentionnés entre parenthèses. Il faut noter que pour les autres classes de fluides frigorigènes (A3, B2L), des exigences plus sévères sont imposées. Les planificateurs débutants doivent consulter un planificateur ou un fournisseur expérimenté avec ces fluides et qui en connaît les pièges.

De plus, les normes et directives mentionnées dans SN EN 378 (avant-propos national) sont à respecter. p.ex. Feuille technique SUVA 66139 Exploitation sûre des installations frigorifiques et des pompes à chaleur).

### **Quelles sont les exigences de sécurité à respecter? La norme SN EN 378 ou le Feuille technique 66139 de la SUVA?**

Selon la configuration de l'espace et le fluide frigorigène, les exigences de sécurité de la norme SN EN 378 sont renforcées par les exigences de la SUVA (sécurité au travail).

L'arbre de décision dans l'Approfondissement 6, (page 207) aide à déterminer quelles exigences respecter dans quel cas.

### **Comment déterminer la quantité maximale de fluides frigorigènes autorisée?**

Selon l'utilisation du bâtiment et l'emplacement des parties et équipements chargés de fluide frigorigène, la quantité maximale (toxicité et protection incendie) de fluides frigorigènes peut être limitée. Les 5 étapes de l'illustration 4.4 montrent le chemin à suivre pour déterminer la quantité maximale de remplissage.

**Important:** La quantité de remplissage maximale est une prescription technique de sécurité. Elle peut être renforcée par les prescriptions environnementales telle que l'ORRChim.

### **Autres mesures de sécurité**

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 d'une éventuelle analyse des risques.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Office fédéral de l'environnement, Berne OFEV: Seuils quantitatifs selon l'Ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM). 3<sup>e</sup> version actualisée, février 2017; [www.bafu.admin.ch/uv-0611-f](http://www.bafu.admin.ch/uv-0611-f)

### 1. À quelle classe de sécurité le fluide frigorigène appartient-il?

La classe de sécurité (voir Illustr. 3.15) montre la toxicité (A ou B) et l’inflammabilité (1, 2L, 2 ou 3) du fluide frigorigène.

### 2. Qui a accès au bâtiment?

La norme SN EN 378-1 (chapitre 4.2.5) distingue trois différentes zones d’installation et/ou d’accès (locaux, parties du bâtiment, bâtiment).

**Catégorie a Accès général:** Emplacement dans lequel séjourne un nombre incontrôlé de personnes. Celles-ci ne sont pas familiarisées avec les mesures de sécurité. Exemples: hôpitaux, supermarchés, écoles, hôtels, auberges, appartements etc.

**Catégorie b Accès surveillé:** Emplacement où ne séjourne qu’un nombre déterminé de personnes. Au moins l’une d’entre elles est familiarisée avec les mesures de sécurité. Exemples: locaux de bureaux ou commerciaux, laboratoires etc.

**Catégorie c Accès réservés:** Accès uniquement pour les personnes autorisées. Celles-ci sont familiarisées avec les mesures de sécurité. Exemples: entreprises de production (produits alimentaires, chimie, laiteries, abattoirs), zone non publique des supermarchés etc.

### 3. Où se trouvent les composantes frigorigènes?

Dans le cas du lieu d’installation de l’installation frigorifique ou des éléments conducteurs de fluide frigorigène, il convient de distinguer les quatre classes suivantes:

**Classe I** Tout dans la zone de séjour des personnes: L’installation frigorifique ou les éléments conducteurs de fluide frigorigène se trouvent dans la zone de séjour des personnes.

**Classe II** Tous les compresseurs et réservoirs de pression se trouvent dans le local technique ou à l’air libre. La conduite, l’évaporateur, les vannes peuvent se trouver dans la zone de séjour des personnes.

**Classe III** Tout dans le local technique ou à l’air libre: Tous les éléments conducteurs de fluide frigorigène se trouvent dans un local technique ou à l’air libre.

**Classe IV** Enceinte ventilée: Tous les éléments conducteurs de fluide frigorigène se trouvent dans une enceinte ventilée.

### 4. Quelle est la grandeur du local?

Le volume net, est défini par le local le plus petit dans lequel se trouve des composants frigorifiques et où séjournent des personnes. (SN EN 378-1, Chapitre 7)

### 5. Détermination de la charge maximale de remplissage

Les exigences posées aux valeurs limites de la quantité de remplissage de fluides frigorigènes figurent dans les valeurs mentionnées dans le tableau de la norme SN EN 378-1:

1. Base de toxicité voir Tableau C1
2. Base d’inflammabilité voir Tableau C2

La plus petite valeur des deux détermine la quantité de remplissage maximale autorisée.

Illustration 4.4:  
Les cinq étapes permettant de déterminer la charge de fluide frigorigène maximale autorisée pour un système de climatisation.



Toutes les installations doivent être protégées contre des surpressions du système. Selon le type et la taille de l'installation, les conduites de décharge des soupapes de sécurité doivent être reliées directement à l'air libre ou à un récipient de récupération spécial. Les réglementations et directives pertinentes doivent être respectées.

Les prescriptions et réglementations en vigueur indiquent si (et le cas échéant comment) l'aération des salles contenant des machines frigorifiques-thermiques doit être conçue en prévention de risques éventuels pour les personnes ou l'environnement. En cas de doute, contacter les autorités compétentes (p.ex. SUVA).

### Conditions techniques

L'emplacement de la machine frigorifique et de l'aéroréfrigérant doit être étudié par l'architecte dès la planification, en tenant compte des espaces critiques vis-à-vis du bruit (chambre à coucher, bureau etc.) et des propriétés voisines. Il convient de prendre en compte l'insonorisation, en particulier contre les bruits solidiens. Une attention particulière doit être accordée aux aéroréfrigérants installés à l'extérieur lors du fonctionnement de nuit en été.

### Dimensionnement de la production de froid

Lors du dimensionnement de la machine frigorifique, trois apports énergétiques déterminent la puissance de refroidissement:

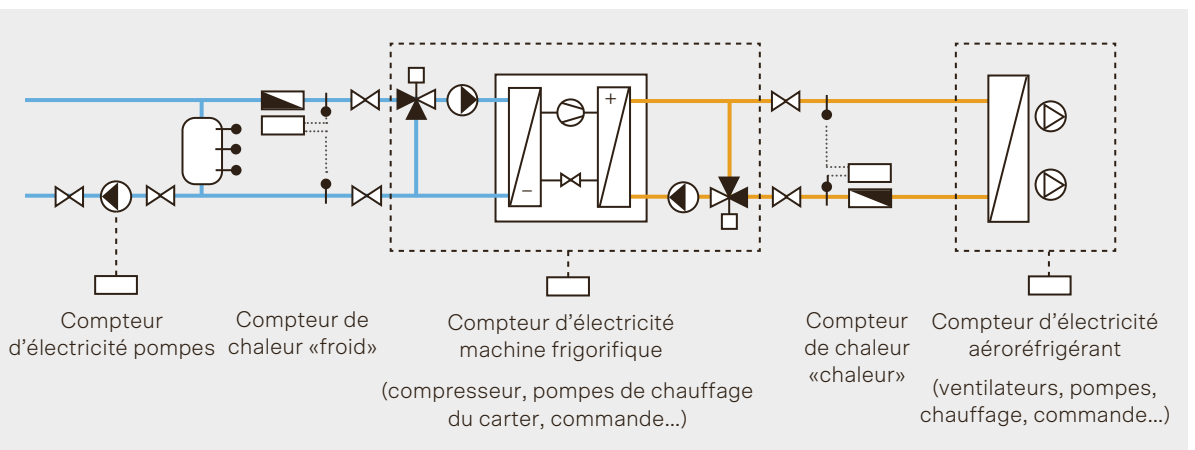
1. Charges de refroidissement externes
  - Apport de chaleur de l'extérieur via l'enveloppe et la ventilation
  - Le calcul des charges de refroidissement externe est effectué selon la norme SIA 382-2.
2. Charges de refroidissement internes
  - Apport énergétique par l'utilisation (personnes, éclairage, machines)
  - Les valeurs des utilisations standard selon le Cahier technique SIA 2024 peuvent être utilisées pour une première ébauche des charges de refroidissement internes dans l'avant-projet.
3. Charges thermiques latentes (cachées)
  - Teneur en vapeur d'eau dans l'air ambiant

Pour déterminer la puissance de refroidissement nécessaire, il faut tenir compte des trois apports énergétiques. La puissance frigorifique effectivement requise est constituée des valeurs suivantes:

1. La demande de refroidissement de la ventilation  $\dot{Q}_V$  divisée en charges de refroidissement externe (conditions extérieures) et interne (température ambiante).
2. La demande de refroidissement de la salle (plafonds rafraîchissants, aéroréfrigérants à air recyclé etc.)  $\dot{Q}_S$
3. La demande de refroidissement des processus  $\dot{Q}_P$ .

La somme de ces apports énergétiques donne la charge de refroidissement d'une

Illustration 4.5:  
Exemple d'un concept de mesure d'un système frigorifique avec un post-refroidissement.



salle. Cependant, comme toutes les charges ne se produisent jamais simultanément à 100 %, les charges de refroidissement individuelles sont prises en compte avec un facteur de simultanéité. Cela permet de s'assurer que la puissance de refroidissement n'est pas inutilement surdimensionnée.

#### Concept de mesure

Le planificateur doit penser au concept de mesure dès l'avant-projet. Y a-t-il besoin d'une mesure uniquement pour la réception de garantie ou aussi pour contrôler le système et l'efficacité énergétique? L'énergie de refroidissement est une forme d'énergie précieuse et coûteuse. De plus en plus de bâtiments ne doivent pas être chauffés mais refroidis, et il est donc nécessaire d'enregistrer la consommation spécifique du froid **coûteux produit** pour les différents locataires.

#### Mesures pour la réception de garantie:

L'objectif est de comparer les informations fournies par le fabricant dans son offre et dans le contrat avec les données réelles lors de l'exploitation. Les instruments de mesure mobiles peuvent être utilisés pour la réception de la garantie, notamment pour la mesure du débit volumique.

**Concept de mesure de l'énergie:** La mesure de l'énergie permet de vérifier si les exigences de planification sont respectées. En outre, cette mesure permet de contrôler l'énergie et fournit les données nécessaires à l'optimisation opérationnelle et à un éventuel décompte des coûts énergétiques. Un tel concept nécessite l'installation fixe des instruments de mesure. Lors de la mise en place de ce dispositif, il convient de tenir compte des points suivants:

- Haute précision de la mesure du débit avec une distance suffisante entre l'entrée et la sortie.
- Mesure précise de la température: attention à la stratification

- Mesure de la puissance: mesure du courant avec une grande précision (tension et courant pour les 3 phases)
- Établissement d'un bilan énergétique pour vérifier la mesure.
- Étalonnage des compteurs de chaleur et d'électricité utilisés pour répercuter les coûts sur les locataires.

### 4.3 Normes et exigences

La norme SIA 382/1 (2014)<sup>4</sup> contient les considérations nécessaires pour qu'une installation de ventilation ou climatisation fournisse, avec une consommation énergétique modérée, des conditions thermiques agréables dans les locaux durant toute l'année en limitant les répercussions négatives sur la santé et la construction. Grâce à des définitions précises de l'état de confort basées sur la norme SIA 180 ainsi que des valeurs de garantie et des conditions d'acceptation, la norme SIA 382/1 (2014) vise à définir clairement les besoins des utilisateurs et à ce que les conditions pertinentes puissent être quantifiées et contrôlées.

#### Exigences constructives

Dans la norme SIA 382/1 (2014), les exigences constructives concernant la protection thermique et la protection contre l'humidité sont définies conformément à la norme SIA 180. Les valeurs limites des exigences relatives à l'enveloppe thermique du bâtiment sont définies sur la base de la norme SIA 380/1. Les exigences constructives pour les bâtiments équipés d'installations de ventilation et de climatisation s'appliquent à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment, à la protection thermique en été, à la protection contre l'humidité et au confort des utilisateurs.

#### Conditions pour qu'un bâtiment puisse être refroidi

Le refroidissement ne peut être mis en œuvre que si les exigences constructives

<sup>4</sup> Norme SIA 382/1 (2014): Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises, 2014

selon la norme SIA 382/1 (2014) et la loi sur l'énergie<sup>5</sup> sont respectées. Le besoin de refroidissement peut être précisé:

1. En cas d'exigences particulières concernant la température de l'air ambiant: espaces de vente et halles de stockage de marchandises sensibles à la température, laboratoires ou salles de serveurs conçus pour 26°C etc.
2. En cas d'augmentation de l'apport de chaleur interne avec ou sans ventilation par les fenêtres (avec ou sans refroidissement nocturne)
3. Pour les températures élevées des pièces en été (apport de chaleur supérieur à 250 Wh/m<sup>2</sup> en 12 heures ou 350 Wh/m<sup>2</sup> en 24 heures, à prouver par simulation ou mesures)
4. Pour des exigences spécifiques de processus ou de production (industrie alimentaire et pharmaceutique, hôpitaux, mécanique de précision etc.)

#### **Machine frigorifique ou pompe à chaleur?**

La meilleure utilisation de l'énergie électrique est obtenue lorsque l'installation est utilisée simultanément comme machine frigorifique et comme pompe à chaleur (machine frigorifique-thermique MFT). De cette façon, on utilise à la fois le froid produit et la chaleur engendrée. Souvent, cela n'est possible que si l'utilisateur de la puissance frigorifique a également une demande de chaleur (p. ex. le préchauffage de l'eau chaude ou le réchauffage de l'air pour la déshumidification). Lorsque toute la chaleur produite est utilisée, on peut supposer qu'il s'agit «techniquement» d'un système de type pompe à chaleur.

#### **Exigences relatives à l'utilisation de la chaleur**

Selon la loi sur l'énergie (LEne), la chaleur produite lors du refroidissement doit être utilisée dans la mesure où cela est techni-

quement et opérationnellement possible, et économiquement viable. Cela s'applique en particulier aux installations frigorifiques qui fonctionnent toute l'année. Dans tous les cas, celles-ci doivent être exploitées en fonction de la demande.

#### **Exigences relatives aux températures d'eau glacée**

Pour la production de froid, la température de l'eau glacée doit être aussi élevée que possible.

Pour les applications de climatisation, les valeurs suivantes s'appliquent selon la norme SIA 382/1 (2014). Des températures plus élevées sont également possibles en fonction du projet:

- Applications de refroidissement sans déshumidification à partir de 14 °C
- Applications de refroidissement avec déshumidification partielle à partir de 10 °C
- Applications de refroidissement (refroidissement de processus) avec déshumidification contrôlée à partir de 6 °C (voir également Chap. 6.2).

Pour les cas particuliers où la température de l'eau glacée est plus basse (inférieure à 6 °C), il faut installer un système séparé avec son propre niveau de température, conformément à l'ORRChim. Si la charge de froid est déterminée par la température de l'air extérieur, il doit être possible de lier le point de consigne de la température de l'eau glacée à cette température de l'air extérieur.

#### **Détermination du besoin en froid**

L'utilisation de méthodes de calcul exactes et de programmes de simulation est importante pour la planification. Toutefois, dans la phase d'avant-projet et de conception, les valeurs empiriques et les chiffres de référence (SIA 2024 Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et la technique du bâtiment) sont mieux adaptés aux optimisations de concepts. La norme SIA 382/2 (Bâtiments climatisés – Puissance requise et besoins d'énergie) décrit les exigences relatives aux méthodes de détermination de la

<sup>5</sup> Justificatif énergétique EN-5: Refroidissement/Éclairage

demande de puissance thermique ou de chauffage et de climatisation des bâtiments. Cette norme traite également du calcul de la puissance et de la demande d’énergie au niveau de l’énergie finale. Elle est destinée à optimiser les bâtiments climatisés et humidifiés. Elle est complétée par le Cahier technique SIA 2044, qui décrit en détail la procédure de calcul standard.

#### Autres normes importantes

Les normes SIA 384/201 (Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base) et SIA 380/1 (Besoin de chaleur pour le chauffage) doivent également être respectées.

La norme SIA 380/1 a pour objectif une utilisation modérée et économique de l’énergie pour le chauffage des bâtiments et est coordonnée avec le MoPEC 2014 (Modèle de prescriptions des cantons dans le domaine de l’énergie). Cette norme contribue ainsi à une méthode de construction écologique.

### 4.4 Procédure lors de la planification

#### Exigences posées au système

Lors de la planification de la production et de la distribution de froid, il faut tou-

jours tenir compte du côté chaud – l’utilisation ou l’évacuation (élimination) de la chaleur produite. Le cas optimal et économiquement très intéressant est l’utilisation de ces deux «côtés».

#### Schéma de base

Le point de départ de la planification est le schéma de base de l’approvisionnement en froid (chaleur). Idéalement, la machine est au centre, gérant un accumulateur à la fois du «côté froid» (entrée d’énergie) et du «côté chaud» (sortie d’énergie). La gestion alternative de l’accumulateur met la machine en marche, soit en «mode thermique» (besoin de chaleur), soit «mode frigorifique» (besoin de froid). Si, par exemple, il y a un besoin en froid par des mesures correspondantes sur l’accumulateur du médium frigoporteur et que la machine est mise en marche en conséquence, l’état de charge de l’accumulateur du médium caloporteur doit être vérifié immédiatement. En effet, la production du «froid» demandé rend impérative l’évacuation de la chaleur accumulée. Dès que l’accumulateur du médium caloporteur a atteint un certain état de charge (p.ex. 80%), un «consommateur forcé» doit être activé. Il peut s’agir, par exemple, de l’apport d’énergie dans le champ de sondes géothermiques ou de l’évacuation de l’éner-

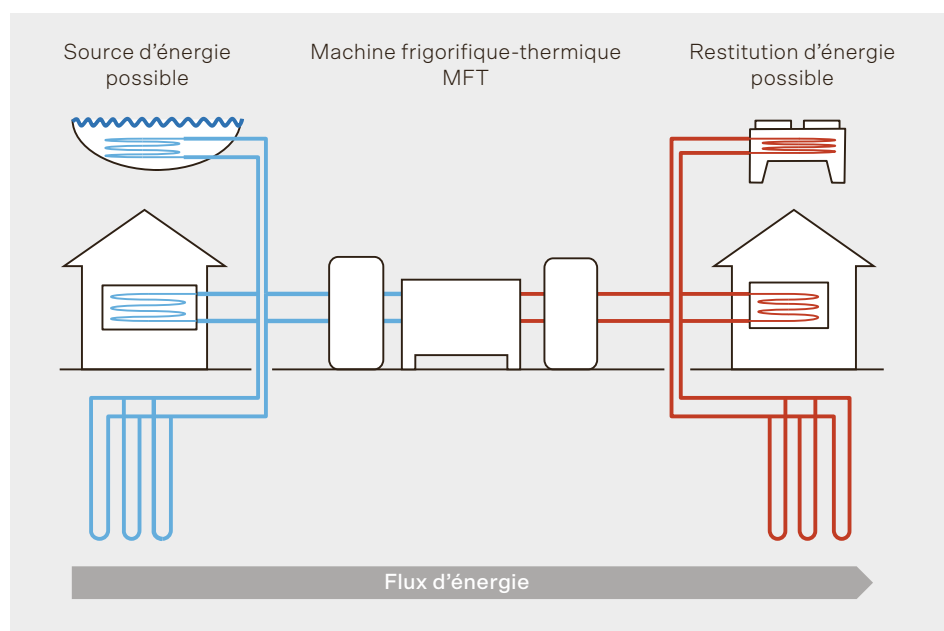


Illustration 4.6:  
Système global avec les sources d’énergie, la machine frigorifique-thermique et les possibilités de distribution de la chaleur.

gie par les aéroréfrigérants vers l'extérieur (évacuation de l'énergie). Il en va de même à l'inverse: Si la machine est enclenchée en mode thermique, il faut prévoir les sources d'énergie nécessaires (le refroidissement de la pièce, mais également l'eau souterraine, du lac ou du cours d'eau, le champ de sondes géothermiques etc.).

#### **En l'absence de besoin de chaleur**

Selon le projet, il peut n'y avoir aucune possibilité d'utilisation de la chaleur ou qu'une possibilité modeste. Dans ces cas, l'accumulateur thermique peut être supprimé et l'énergie produite peut être libérée directement dans l'environnement. Cependant, il est impératif que la température de condensation soit décalée en fonction de la température extérieure. De cette façon, la température de condensation peut être réduite pendant les périodes plus fraîches (printemps, automne, hiver), l'efficacité du système sensiblement augmentée et la rentabilité améliorée.

### Liste de contrôle: conception

Points auxquels le planificateur doit penser lors de la conception du projet.

#### 1. Pour la production

- Puissance (médium frigoporteur, médium caloporteur)
- Disponibilité (exigences en matière de sécurité d'approvisionnement)
- Répartition de la production entre plusieurs machines (au moins avec des circuits séparés)
- Plage de régulation de la machine, gradation de la puissance
- Intégration hydraulique des machines
- Temps de fonctionnement  $Q_{\text{Froid}}$  de la machine frigorifique de 0 à 100 %
- Tolérance maximale de température (chaleur-froid)
- Raccordement électrique, capacité du transformateur et prescriptions PDIE (courant de démarrage)
- Conditions, souhaits du client
- Conditions géologiques (sondes géothermiques, eaux souterraines)

#### 2. Pour les consommateurs de froid

- L'air soufflé ou l'air ambiant est-il refroidi de manière sensible ou latente?
- Température de départ du circuit de froid requise ( $T_{\text{CF-Dép}}$ ), tolérance de température admissible
- Augmentation de la température du fluide frigoporteur (hiver)
- Quelle est la température de retour prévue du circuit de froid ( $T_{\text{CF-Ret}}$ )?
- Puissance frigorifique requise, influencée par la météo: charge de base, pic de jour, minimum de nuit, week-end
- Puissance frigorifique requise (charge interne, refroidissement hivernal): charge en ruban, pic de jour, minimum de nuit, week-end
- Taille maximale d'accumulateur possible
- Stockage saisonnier avec couplage géothermique (sondes géothermiques) prévu

#### 3. Pour les consommateurs de chaleur

- Température de départ de chauffage requise ( $T_{\text{CF-Dép}}$ ), tolérance de température admissible
- Réduction de la température de l'eau surchauffée (été)
- Quelle est la température de retour prévue ( $T_{\text{CF-Ret}}$ )?
- Clarifier l'utilisation de la chaleur (chauffage de l'eau sanitaire, puissance de pointe, besoin journalier, charge de base)
- Puissance de chauffage requise
- Puissance de chauffe requise influencée par la météo: pic de jour, minimum de nuit, week-end
- Taille maximale possible d'accumulateur
- Stockage saisonnier avec couplage géothermique (test des sondes géothermiques)
- L'air soufflé est-il préchauffé ou réchauffé?

### Remarques relatives à l'hydraulique

Le système hydraulique doit être conçu pour être aussi simple que possible. Les systèmes complexes et les réglages compliqués des volets sont à éviter autant que possible. Si nécessaire, les circuits hydrauliques doivent être séparés au moyen d'un échangeur de chaleur.

Le système hydraulique doit être conçu de manière à ce que les mesures de températures et de débit volumique soient possibles à tout moment; pour le débit, une mesure ponctuelle est souvent suffisante, surtout dans les systèmes à débit volumique constant. Un simple tronçon de tuyauterie peut alors être pris en compte.

- Pour la mesure de la pression ou de la pression différentielle, il faut installer des dispositifs appropriés (p. ex. des embouts de mesure Twinlock): cela permet de contrôler les pompes de l'extérieur et d'optimiser leur exploitation.
- En cas de débit volumique variable dans le circuit de l'évaporateur ou du condenseur, les spécifications du fournisseur de la machine doivent être respectées.
- Afin d'éviter la surchauffe accidentelle du circuit de l'évaporateur ou du condenseur, il est conseillé de prévoir un circuit de sécurité approprié (exemple: machine frigorifique «HORS», pompe «EN», vanne de mélange reste en position de déviation «bloquée»).
- Utiliser l'eau traitée (selon SICC BT102).

### Intégration de la machine frigorifique

Le circuit de mélange doit permettre de respecter les valeurs-limites de température admissibles tant du côté de l'évaporateur (température d'entrée maximale) que du côté du condenseur (température d'entrée minimale) et d'éviter les dysfonctionnements (voir également Chap. 8.3).

Lorsque des accumulateurs stratifiés sont utilisés des deux côtés (médiums frigoporteur et caloporteur), il est obligatoire que le médium (mélangé) introduit dans ces accumulateurs ait la température de dimensionnement. Si tel n'est pas le cas, non seulement la stratification de la température – et donc la capacité de stockage – peut être altérée, mais aussi la mesure de la température pour la commande (et la commande séquentielle) des machines. Selon la manière dont le médium est introduit dans l'accumulateur, cela peut entraîner de fortes variations de température et donc des dysfonctionnements (voir Chap. 8.6).

Tant du côté du générateur que de la consommation, il est important que les températures soient maintenues optimales. L'intégration hydraulique des points de consommation doit être soigneusement prévue. Les débits volumiques et les pressions différentielles associées doivent être complètement régulés lors de la mise en service.

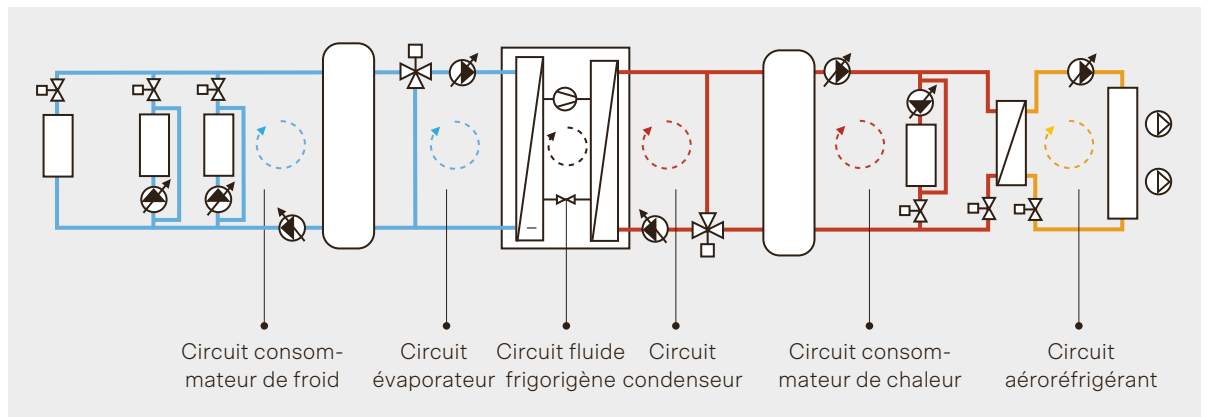


Illustration 4.7:  
Aperçu du système  
global avec les diffé-  
rents circuits.

### Mesures de réduction du bruit

Lors de la planification de machines frigorifiques-thermiques, il convient de procéder à une évaluation minutieuse des émissions sonores. Les mesures de réduction du bruit prises en compte suffisamment tôt évitent des frais inutiles. Des adaptations ultérieures occasionnent souvent des dépenses supplémentaires élevées et beaucoup de tracas.

### Émissions sonores

**Bruit aérien:** Une enceinte insonorisée doit être prévue pour le générateur, et un encapsulage ou un habillage phonique du local est nécessaire pour les grands systèmes. Une attention particulière doit être accordée aux aéroréfrigérants. Chaque compresseur doit disposer de son propre agrément. Cela permet de faire fonctionner tous les aéroréfrigérants les nuits d'été avec des besoins réduits en refroidissement. Dans ce cas, les ventilateurs de refroidissement fonctionnent à faible vitesse, ce qui réduit considérablement le niveau de puissance sonore. L'installation fonctionne donc «silencieusement».

Dans les cas extrêmes, les unités de refroidissement doivent être installées dans un local technique doté silencieux séparateurs aux ouvertures d'entrée et de sortie d'air.

**Bruit solidien:** Le bruit solidien peut être évité par l'utilisation systématique de raccords flexibles (tuyaux, compensateurs, manchons élastiques, connexions électriques flexibles). Pour réduire les vibrations de la pompe à chaleur, il convient d'utiliser des amortisseurs de vibrations disposés entre la pompe et son socle ou entre le socle et le sol en béton.

### Déroulement de la planification selon les phases SIA

Au cours du processus de planification, comme le montre l'illustration 4.8, des clarifications sont apportées, des données sont collectées, des concepts sont élaborés et des décisions sont prises. Dans la description de la phase, les points spécifiques au froid sont mis en évidence, mais fondamentalement les services de planification spécifiés dans les règlements SIA doivent être fournis.



**Phase 31 Avant-projet**

- Décision de principe sur le refroidissement
- Saisie des besoins (utilisation, processus, autres corps de métier, architecture etc.)
- Élaboration du concept: considérer le refroidissement et le chauffage comme un système
- Choix du système et températures possibles du système
- Performances approximatives (premiers calculs)
- Estimation des surfaces techniques (taille des locaux)
- Discussions préliminaires avec les autorités concernant l'approbation du concept
- Estimation approximative des coûts d'investissement et d'exploitation

**Phase 32 Projet de l'ouvrage**

- Compilation des données de puissance (le besoin de refroidissement est souvent difficile à déterminer – une documentation transparente est donc importante).
- Contrôle de l'intégration des composants (installation, révision, remplacement)
- Détermination précise des températures du système et des puissances frigorifiques
- Élaboration d'un concept de mesure (également en ce qui concerne les mesures d'acceptation et l'optimisation opérationnelle)
- Définition des fonctions sommaires
- Élaboration des justificatifs pour les autorités (énergie, bruit, protection incendie etc.)
- Estimation des coûts

**Phase 33 Procédure de demande d'autorisation/projet de mise en œuvre**

- Soumissions aux autorités: l'expérience a montré que les autorisations peuvent être décisives pour l'ensemble du projet: «Justificatif refroidissement» (Justificatif énergétique EN-5), ventilation des centres techniques, désenfumage, voies d'évacuation et exigences en matière de protection incendie, accès pour l'inspection etc.

**Phase 4 Appel d'offres**

- Incorporation des exigences officielles
- Descriptifs de fonctionnement
- Spécification détaillée de la machine avec au moins deux états de fonctionnement
- Répertoire des services pour les demandes de devis
- Appel d'offre, comparaison des offres, adjudications

**Phase 51 Planification de la mise en œuvre**

- Réunion de coordination avec le fournisseur des machines frigorifiques et le fournisseur de l'AG, au cours de laquelle les communications (interfaces de données) sont définies
- Demande des certificats d'usine
- Planification de l'exécution sur la base des données des fournisseurs et des entrepreneurs
- Vérification resp. complément du descriptif de commande et de régulation

**Phase 52 Exécution/direction professionnelle de la construction**

- Réalisation des réceptions d'usine (si nécessaire)
- Contrôle de l'intégralité de l'hydraulique
- Contrôle des dispositifs de sécurité
- Planification de la mise en service

**Phase 53 Mise en service, achèvement**

- Déclarations de performance et documentation
- Mise en service: Coordination avec les fournisseurs des machines frigorifiques et de GA
- Réception: prise en compte des conditions climatiques (températures extérieures)
- Contrôle des performances avec vérification fonctionnelle, réajustement (recommandé)
- Soumission de l'offre pour l'optimisation opérationnelle (phase 6)
- Annonce de l'installation à l'OFEV (voir page 57)

Illustration 4.8:  
Description des phases SIA avec quelques remarques sur les points à prendre en compte spécifiquement pour une installation frigorifique de climatisation.

## 4.5 Pierres d’achoppement fréquentes lors de la planification

Dans la pratique, les planificateurs butent sans cesse sur des points similaires. Quelques exemples à prendre en compte lors de la planification:

- L’installation, la surveillance du fluide frigorigène et la ventilation (ventilation tempête, enceinte des machines) dépendent du type de fluide frigorigène (p. ex. NH<sub>3</sub> ou R134a).
- La quantité de fluide frigorigène influence le débit volumique de la ventilation mécanique (respecter la directive SN EN 378).
- Les machines frigorifiques utilisant des fluides frigorigènes synthétiques ne peuvent être utilisées que dans certaines conditions (voir ORRChim et Guide des fluides frigorigènes de SuisseEnergie).
- Les données de raccordement électrique ont une influence sur l’installation électrique (valeur de raccordement, alimentation, courant de démarrage, courant réactif, temps de délestage etc.). Cela a un impact sur le la composante de puissance des tarifs (courants de démarrage élevés des moteurs de compresseur) et donc sur les coûts de l’électricité.
- Il faut s’assurer que le réseau électrique (l’alimentation du bâtiment) peut fournir une puissance suffisante.
- Il faut tenir compte des dimensions, du type et du nombre de raccordements du côté du médium caloporteur ou frigopporteur (p. ex. un ou deux condenseurs).
- Le poids des composants influence l’installation, l’intégration et les dimensionnements des raccords.
- Il existe de grandes différences entre fabricants au niveau de la philosophie de régulation et la solution d’interface – les possibilités et les plages de régulation disponibles peuvent être très différentes. Un descriptif clair du fonctionnement est donc essentiel. En principe, ceux de la commande de la machine et de la gestion de l’accumulateur doivent être documentés par le fournisseur de la machine. Cependant, tous ne le proposent pas.
- Des débits volumiques variables via la machine sont possibles – en fonction de l’intégration hydraulique de la machine – mais doivent être convenus avec le fournisseur. Ici aussi, un descriptif clair du fonctionnement et un schéma hydraulique avec des données sur les performances sont utiles.
- La plage de régulation de la machine frigorifique influence le dimensionnement de l’accumulateur de froid. Dans le cas d’une machine frigorifique avec régulation en tout-ou-rien, l’accumulateur doit être beaucoup plus grand que pour une machine avec une plage de régulation variable de 20 à 100% ou d’une par paliers ou avec plusieurs machines.
- Lorsque la température de condensation de l’eau chaude sanitaire est augmentée temporairement, l’intégration hydraulique des accumulateurs doit être soigneusement étudiée. Il est en effet possible que la température du médium caloporteur dans l’accumulateur soit affectée et que des fluctuations de température dans le départ de chauffage soient inévitables.
- Dans le cas d’une installation nécessitant une réception, des coûts supplémentaires sont à prévoir pendant l’exploitation pour les contrôles réguliers.
- Un protocole écrit est nécessaire pour l’installation et le retrait de tous les gros appareils et composants (machines frigorifiques-thermiques, accumulateurs, échangeurs de chaleur, unités de ventilation etc.).

## 4.6 Exigences posées aux fournisseurs

Pour que le fournisseur de la machine frigorifique puisse se faire une idée de l'ensemble de l'installation, il a besoin d'une description de ladite installation de la part du planificateur CVC. Il doit transmettre les objectifs du planificateur et du client. Les informations suivantes sont requises:

### Schéma

Schéma complet avec les températures prévues du médium (départ et retour) ainsi que les connexions hydrauliques avec les caractéristiques de puissance saisies.

### Données de dimensionnement

Température de dimensionnement d'hiver et d'été, tout décalage de point de consigne, compilation détaillée des puissances et des courbes de charge.

### Sources énergétiques, stockage

Dispose-t-on d'énergies renouvelables telles que l'air neuf, les sondes géothermiques, l'utilisation d'eaux souterraines, de lacs et de cours d'eau?

Des plaquettes ou des granulés de bois ainsi que du biogaz, du gaz naturel ou du gaz liquéfié sont-ils disponibles pour des niveaux de température plus élevés?

Qu'en est-il de l'installation de la citerne de mazout et de l'alimentation électrique?

### Production de froid-chaud

Compilation détaillée des puissances avec les températures requises, les courbes de charge, la disponibilité, les redondances etc.

### Distribution de froid

Systèmes de refroidissement tels que plafonds rafraîchissants-chauffants, auvents de plafond, panneaux rayonnants froids ou poutres de refroidissement, TABS, regroupement et régulation

### Distribution de chaleur

Systèmes de distribution de chaleur tels que planchers et murs chauffants, plafonds rafraîchissants-chauffants, panneaux refroidissants actifs ou poutres refroidissantes, TABS (système de composants thermoactifs), répartition en groupes et régulation.

### MCR, GTB, gestion de l'accumulateur

Toutes les installations et groupes de construction doivent être équipés de dispositifs de mesure, de commande, de régulation et de surveillance afin de garantir un fonctionnement correct et sûr. Les programmes spécifiques aux projets devraient également intégrer les composants externes du système et assurer ainsi la régulation et la surveillance globales de l'ensemble du système de production, y compris la gestion de l'accumulateur. Cela nécessite une connexion au système de gestion du bâtiment.

### Exemple: Détermination des températures

- 75 °C: Température élevée pour le réchauffage de l'eau chaude sanitaire, le chauffage des dépendances, des bâtiments existants (réduction ultérieure à 65 °C)
- 30 - 38 °C: Basse température pour les systèmes de composants thermoactifs, les plafonds chauffants/rafraichissants, les installations de chauffage de l'air RLT, le chauffage à recirculation d'air, le préchauffage de l'eau chaude sanitaire
- 14 - 18 °C: Froid de climatisation pour système de composants thermoactifs, plafonds chauffants/rafraichissants, refroidisseurs d'air pour systèmes de traitement de l'air, refroidisseurs à circulation d'air
- 6 - 10 °C: Froid de climatisation pour les gros équipements médicaux, déshumidificateurs pour les installations RLT, stock, armoires de conditionnement d'air

### Appels d'offres «fonctionnels» pour des systèmes ou des composants de systèmes

Dans un appel d'offres «fonctionnel», surtout utilisé pour les petits systèmes, «seuls» les objectifs ou les puissances du système ou d'un composant de l'installation sont spécifiés dans des conditions données. De cette manière, on peut s'appuyer sur les connaissances, la créativité et l'expérience des fournisseurs pour spécifier et concrétiser l'installation. La comparaison des différentes offres est exigeante car, selon la documentation, les offres ne sont pas comparables ou le

sont difficilement. Les appels d'offres fonctionnels s'avèrent une bonne solution pour les services globaux ou les petites installations intégrées à la recherche de solutions innovantes. Il est conseillé de faire preuve de retenue dans le cas de services complexes avec un fort potentiel de changement.

### Fonctions à définir pour une production de froid ou une pompe à chaleur

Avec un concept de mesure clairement défini ainsi que l'évaluation des mesures de l'énergie et des médiums, le fournisseur de l'installation doit prouver ou établir les fonctions principales suivantes:

- l'installation doit prouver ou établir les fonctions principales suivantes:
- Des chiffres clés pertinents pour la réalisation des valeurs garanties
- Fourniture de données pour l'optimi-

sation du fonctionnement énergétique (BO)

- Enregistrements de tendances pour la détection précoce des dysfonctionnements
- Base pour les prévisions de consommation et la budgétisation
- Preuve de la conformité aux prescriptions légales (p. ex. la loi sur l'énergie)

Dans l'offre fonctionnelle, les conditions-cadres et les objectifs à atteindre doivent être clairement décrits et inclus comme base dans le contrat de travail.

### Données techniques d'une machine frigorifique-thermique

Afin d'évaluer la qualité d'une machine frigorifique-technique, le planificateur a besoin d'informations détaillées. Il s'agit de l'exploitation de refroidissement, de l'utili-

#### Exploitation de refroidissement avec un aéroréfrigérant à évaporation ouvert et un condenseur

Puissance frigorifique $\dot{Q}_{\text{Froid}}$	300 kW
Puissance de condensation $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$	379 kW
Puissance absorbée $P_{\text{él}}$	79 kW
$\text{COP}_{\text{Froid}}$ – pleine charge	3,8

Entrée d'eau glacée	14 °C
Sortie d'eau glacée	8 °C
Quantité de flux d'eau glacée	43,1 m <sup>3</sup> /h
Part glycolée de l'eau glacée	0%
Perte de charge de l'évaporateur	27 kPa

Entrée de l'eau de l'aéroréfrigérant	34 °C
Sortie de l'eau de l'aéroréfrigérant	40 °C
Flux de l'eau de l'aéroréfrigérant	57,5 m <sup>3</sup> /h
Part glycolée de l'eau de l'aéroréfrigérant	35%
Perte de charge de l'évaporateur	25 kPa

#### Données de charge partielle $\text{COP}_{\text{Froid}}$ et ESEER

avec une température d'eau glacée constante de 8 °C et une température réduite à l'entrée du condenseur ( $T_{\text{C-Ent}}$ ).

Charge %	$T_{\text{WE}}$ °C	$\dot{Q}_{\text{Froid}}$ kW	$P_{\text{él}}$ kW	$\text{COP}_{\text{Froid}}$	ESEER %
100	30	300	79	3,8	0,1
75	26	225	41	5,5	33
50	22	150	16	9,4	41
25	18	75	7	10,7	23
ESEER					8,2

#### Régulation de la puissance Mode d'exploitation de la chaleur par rapport à la puissance frigorifique

En continu de	70% à 100%
Puissance minimale $\dot{Q}_{\text{Froid}}$ à	~180 kW

#### Régulation de la puissance frigorifique

En continu de	25% à 100%
---------------	------------

Nombre de condenseurs	1 pièce
Nombre d'évaporateurs	1 pièce
Facteur d'encrassement de l'échangeur	0,044 m <sup>2</sup> K/kW

Nombre de compresseurs (turbo-compresseur sans huile)	1 pièce
Fréquence des phases de tension	400-3-50
Courant nominal	max. 145 A
Courant de démarrage	5 A
Circuits frigorifiques	1 pièce
Type/quantité de fluides frigorigènes R134a/70 kg	

Poids en exploitation	1500 kg
Longueur	1900 mm
Largeur	1100 mm
Hauteur	1900 mm

Pression sonore	72 dB(A)
Niveau de puissance sonore	81 dB(A)

Illustration 4.9:

Données techniques nécessaires à l'évaluation d'une machine frigorifique-thermique (exemple).

sation de la chaleur, du fonctionnement à charge partielle, de la disponibilité, des informations sur le fluide frigorigène et la quantité de remplissage, et des données sur le bruit (ou la puissance sonore). L'illustration 4.9 montre les données les plus importantes dont un planificateur a besoin pour une évaluation sérieuse.

#### 4.7 Que faut-il observer lors de la mise en service et de la réception?

##### Obligation de notification

Toute personne qui met en service (ou hors service) une installation fixe contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène dont le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est stable dans l'air doit en informer l'OFEV. Pour les nouvelles installations, le numéro ad hoc communiqué par l'OFEV doit être apposé visible-

ment, de manière lisible et permanente au moyen d'un adhésif.

##### Tests intégrés (tests de fonctionnement)

Après la mise en service des installations, des essais intégrés de fonctionnement doivent être effectués pour chaque corps de métier ainsi que pour l'ensemble selon un plan d'essai, puis protocolés.

Les points suivants doivent être testés:

- Schéma de principe avec spécifications de puissance et de température
- Dimensionnement et caractéristiques essentielles de puissance des chauffe-eau, des accumulateurs, des champs de sondes géothermiques, des pompes etc.
- Protocole de disponibilité (sécurité opérationnelle, redondance etc.)
- Descriptif du fonctionnement et de la régulation: commande des installations, surveillance, sécurité etc.

Grandeurs de mesure	Tolérance par rapport à la valeur de consigne	Type d'écart	
		relatif	absolu
Débit volumique d'air			
- pour le local alimenté	± 15 %	X	
- pour chaque installation et chaque conduite d'alimentation principale	± 10 %	X	
Température de l'air soufflé	± 1,0 K		X
Température ambiante	± 1,0 K		X
Vitesse de l'air ambiant ( $V_{50\%}$ )	± 15 %	X	
Humidité relative du local	± 15 %	X	
Différence de pression	± 10 %	X	
Consommation d'électricité	± 5 %	X	
Puissance électrique absorbée	± 10 %	X	
Tension électrique	± 5 %	X	
Température de l'eau	± 1,0 K		X
Courant massif des fluides	± 10 %	X	
Puissance thermique et frigorifique	± 15 %	X	
Niveau sonore continu équivalent en énergie et niveau d'évaluation	1)		X

1) Les dispositions de la norme SIA 181 s'appliquent (spécification de nombres entiers, pas de tolérance, répétition des mesures jusqu'à ce que les valeurs garanties soient atteintes).

Exemple: Valeur de consigne pour l'humidité ambiante = 40 % H. r.

Tolérance relative par rapport à la valeur de consigne ± 15 %

Plage de tolérance entre 34 et 46 % H. r.

Lorsque la valeur mesurée est comprise entre 34 et 46 % H. r., les conditions d'acceptation sont remplies.

Illustration 4.10:  
Tolérances des grandeurs de mesure.  
(Source: SIA 382/1 (2014))

- Protocole sur la qualité de l'eau dans le réseau de conduites
- Protocole de maintenance: vérification de l'accessibilité des installations, opérations de maintenance etc.
- Justificatif des puissances (inclure dans le procès-verbal de réception une réserve selon laquelle les puissances doivent être prouvées dans des conditions extérieures correspondantes).
- La preuve que l'équilibrage hydraulique a été effectué
- Le coefficient de performance ( $COP_{\text{Chaleur}}$ ) et les performances des systèmes des pompes à chaleur
- Le coefficient de performance ( $COP_{\text{Froid}}$ ) et la puissance des machines frigorifiques
- Les volumes d'eau des systèmes hydrauliques

La conformité aux données de puissance spécifiées pour les différents équipements techniques du bâtiment doit être démontrée dans des conditions réelles de fonctionnement qui doivent prouver que les composants individuels et l'installation dans son ensemble atteignent les valeurs de consigne convenues. Dans la plupart des cas, ces mesures ne peuvent pas être simplement interprétées à partir des données théoriques. Les conditions extérieures réelles lors des mesures de contrôle doivent donc toujours être enregistrées. Lors de la mesure de quantités dépendant de la charge, l'objectif doit être de maintenir le fonctionnement stationnaire (p.ex. toutes les portes et fenêtres doivent rester fermées pendant les mesures).

#### Conditions de réception

Les conditions de réception sont remplies si les valeurs mesurées se situent dans la plage de tolérance convenue par rapport à la valeur de consigne. Par défaut, les exigences de la norme SN EN 12599 avec les tolérances des quantités mesurées sont applicables (voir SIA 382/1 (2014): Tabl. 27 Tolérances des grandeurs de mesure). Toutes les exigences convenues doivent être remplies simultanément.

#### Mise en service

La mise en service doit être effectuée conformément aux spécifications de la norme SIA 378/4. En particulier, la vérification métrologique avec les calculs associés et l'enregistrement des données de performance suivantes est requise:

Il est judicieux d'instruire l'exploitant pour la première fois lors des tests et de lui fournir les documents nécessaires. Par la suite, tous les exploitants doivent être formés. La formation s'appuie sur une documentation complète du système. Cette étape une fois franchie, l'acceptation préliminaire et la rectification des défauts peuvent avoir lieu.

#### Tests intégraux (fonctions interconnectées)

Les tests intégraux permettent de vérifier les fonctions interconnectées des installations du bâtiment et de sécurité ainsi que le fonctionnement du système global (p.ex. le test de Blackout). En outre, les points faibles sont identifiés. Cet essai est réalisé sur la base du Cahier technique SIA 2046. Il est important que les dispositions d'application soient remplies avant le test.

#### Sessions de suivi

Les exploitants peuvent bénéficier d'au moins une session de suivi (p.ex. après un semestre).

#### Réajustement

Il est conseillé de procéder à un réajustement et à un contrôle du système après 300 heures de fonctionnement. Il est judicieux d'en convenir dans le cadre du contrat de travail et de services.

#### Contrôle des résultats

Les performances d'homologation ne pouvant être déduites des données théoriques, on peut procéder à un contrôle des performances réelles, même pour des valeurs approchées. La décision de

procéder à un contrôle des résultats est convenue au cas par cas entre le client et le planificateur et est au moins partiellement commandée séparément. Les défauts découverts lors du contrôle des résultats font partie des services de garantie et doivent être signalés comme des vices cachés. Le contrôle des résultats a lieu après la mise en service, la réception et la correction des défauts dans un délai d'un à deux ans.

Le contrôle des résultats poursuit des objectifs tels que:

- Une exploitation sans défaut
- Preuve du bon fonctionnement des installations dans des conditions réelles d'exploitation (été, hiver, période intermédiaire).
- Mesure de l'ESEER pour la machine frigorifique et du COP (coefficient de performance annuelle) pour la pompe à chaleur.

Un contrôle des résultats est souvent commandé en même temps qu'une optimisation opérationnelle.

## 4.8 Maintenance et entretien de l'installation de climatisation

### Optimisation de l'exploitation

L'optimisation de l'exploitation (BO) est réalisée au cas par cas après concertation entre le propriétaire du bâtiment et le planificateur (ou une institution externe) et fait l'objet d'une commande séparée. L'optimisation de l'exploitation devrait se fonder sur le Cahier technique SIA 2048 Optimisation énergétique de l'exploitation. Si une optimisation de l'exploitation est organisée immédiatement après la réception, tout défaut découvert est considéré comme faisant partie des services de garantie et doit être signalé comme un vice caché.

L'optimisation de l'exploitation est réalisée après la mise en service, la réception, la correction des défauts et le contrôle des résultats au cours des deux premières années. Le contrôle des résultats des mesures d'optimisation de l'exploita-

tion a généralement lieu au cours de la troisième année.

L'optimisation de l'exploitation poursuit les objectifs suivants:

- Adaptation de l'exploitation de l'installation pour une utilisation efficace
- Réduction de la consommation d'énergie et des coûts d'exploitation

### Maintenance

L'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (OR-RChim) stipule que les propriétaires d'appareils et d'installations contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène doivent tenir un livret d'entretien. Le spécialiste qui effectue les travaux de maintenance doit saisir les informations nécessaires dans ce livret après l'entretien et après chaque intervention.

### Contrôle d'étanchéité

Toutes les installations de climatisation contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène stable dans l'air doivent faire l'objet d'un contrôle d'étanchéité régulier, mais au moins à chaque intervention et à chaque maintenance. (Pour plus de détails, voir l'Approfondissement 7 Fluides frigorigènes - Substitution et contrôle d'étanchéité à la page 208).

### Obligation de déclaration

Les installations de climatisation contenant plus de 3 kg de fluides frigorigènes doivent être déclarées à l'OFEV lors de leur mise en et hors service ([www.bafu.admin.ch/communication-ff](http://www.bafu.admin.ch/communication-ff)).

### Surveillance technique

Pour les installations dont la charge de fluide frigorigène est égale ou supérieure à 25 kg par circuit, une surveillance technique de l'air ambiant avec un dispositif d'alarme automatique est nécessaire pour la détection précoce des fuites. Il faut surveiller au moins le local des machines et, en cas d'installation à l'extérieur ou sur le toit, l'air intérieur de l'enveloppe de l'installation. Il est possible de renoncer à la surveillance technique des condenseurs refroidis par air. La norme

SN EN 378-3 fournit des prescriptions supplémentaires pour la sécurité des personnes.

En particulier, l'étanchéité des soupapes de sécurité doit être contrôlée. Pour des teneurs en fluide frigorigène plus importantes, l'utilisation de disques de rupture ou au moins l'installation de pièges à huile est recommandée (voir SN EN 378-2). (voir OFEV: uv-1726-d)

#### **Fluide frigorigène: remplissage et substitution**

Les installations existantes peuvent continuer à être exploitées même si elles contiennent un fluide frigorigène dont le rechargement n'est plus autorisé (p.ex. R22). Toutefois, en cas de perte de fluide frigorigène (p.ex. en raison d'une fuite), celui-ci doit être complètement récupéré et remplacé par un fluide autorisé.

Dans ce cas, il faut bien vérifier si cela vaut vraiment la peine de convertir le circuit frigorifique à un fluide frigorigène de substitution approprié. Cela s'applique également à la transformation de l'installation (p.ex. le remplacement du compresseur). (Pour plus de détails, voir l'Approfondissement 7, page 208).

#### **Règle de base pour le remplacement du fluide frigorigène:**

Pour les refroidisseurs d'eau de plus de 10 ans et les systèmes de climatisation dont la puissance frigorifique est inférieure à 80 kW, il convient de toujours envisager le remplacement de l'installation.



## Digression

### Construire sans refroidissement – que faut-il envisager?

Il existe deux stratégies différentes pour maintenir un climat intérieur confortable et protéger le bâtiment de la chaleur estivale:

- Empêcher le bâtiment de se réchauffer fortement par des mesures constructives.
- Évacuer la chaleur existante par des mesures techniques ou gérer de manière optimale le renouvellement de l'air dans les pièces. Il s'agit généralement d'installations de ventilation avec récupération de chaleur, qui sont standard dans de nombreux bâtiments neufs (bâtiments Minergie, immeubles commerciaux, hôpitaux etc.).

#### Isolation et choix des couleurs

Dans les bâtiments neufs ou existants, l'isolation est une mesure importante pour protéger le bâtiment d'un réchauffement excessif. Pour une bonne isolation en hiver, il faut un matériau dont la conductivité thermique est la plus faible possible. Pour empêcher la chaleur estivale d'entrer, il faut un matériau isolant ayant une capacité de stockage de la chaleur aussi faible que possible. Les matériaux d'isolation doivent donc combiner ces deux propriétés. La couleur de la façade a également un effet sur les températures à l'intérieur de la maison: les couleurs claires reflètent plus fortement la lumière du soleil et ne chauffent donc pas autant que les couleurs foncées. Cependant, une bonne isolation ne signifie pas que le refroidissement n'est pas nécessaire. En outre, une bonne isolation peut s'avérer contre-productive en cas d'augmentation de l'émission de chaleur depuis l'intérieur. De bons conseils de physique du bâtiment sur le choix et le type d'isolation des bâtiments contribuent donc de manière significative à la protection contre la chaleur et le froid.

#### Fenêtres et ombrage

La taille, la position, le type et le nombre de fenêtres doivent être optimisés en combinaison avec des dispositifs d'ombrage et inclus dans un concept de protection thermique efficace. Si nécessaire, il est judicieux de limiter la proportion des surfaces de fenêtres ou de renoncer aux grandes baies vitrées. Il existe également une large gamme de mesures et d'éléments d'ombrage pour les bâtiments existants, tels que des volets roulants, pliants ou coulissants flexibles, des stores ou des auvents. Les dispositifs d'ombrage montés à l'extérieur sont beaucoup plus efficaces car les rayons du soleil ne frappent pas directement le verre de la fenêtre. Des fenêtres spécialement teintées (verre de protection solaire) ou des fenêtres avec un film de protection solaire offrent une alternative mais laissent également entrer moins de lumière dans la maison. L'ombrage interne garde moins la chaleur et n'est recommandé que comme protection contre l'éblouissement.

#### Points de contrôle

Les points suivants sont à respecter:

- Optimiser le nombre, la taille et l'orientation des fenêtres et les équiper d'éléments d'ombrage
- Si possible, ne pas imperméabiliser le sol à proximité du bâtiment
- Les arbres sont des sources naturelles d'ombre sur la propriété (avec le risque d'ombrager involontairement le bâtiment au détriment de la luminosité)
- Choix correct du matériau d'isolation pour la toiture et les façades
- Utiliser des matériaux de construction naturels
- Couleurs claires des façades
- Toits végétalisés (rétention des eaux de pluie et protection contre la chaleur)

- Envisager de végétaliser la façade de la maison
- Pour les éléments de protection solaire fixes, tenir compte de la position du soleil en été et en hiver
- Contrôler le refroidissement nocturne automatisé (protection contre le vent et les intempéries, protection anti-effraction)
- Si le refroidissement nocturne n'est pas une option, il faut au moins envisager un refroidissement de l'air fourni.

Des informations complémentaires figurent dans la norme SIA 180, chapitre 5 «Isolation thermique en été».

## 10 points relatifs à la planification d'une climatisation de confort

1. Il est souvent difficile de déterminer correctement le besoin de froid – il est donc nécessaire de disposer d'une documentation transparente et compréhensible sur la façon dont le besoin de refroidissement a été déterminé et avec quelles hypothèses.
2. Lors de la conception de la climatisation de confort, le côté chaud est toujours pris en compte afin de trouver une exploitation judicieuse de la chaleur.
3. Avec un concept de mesure minutieux, les planificateurs créent la base nécessaire à la réception de garantie, au contrôle des spécifications de planification et au contrôle de l'énergie. Ce dernier est la condition préalable à l'optimisation du fonctionnement.
4. Les bonnes installations de climatisation évitent les basses températures du système. Ce n'est que dans des cas exceptionnels – lorsque l'air doit être déshumidifié – que des températures d'eau glacée de 10 °C ou moins sont nécessaires.
5. Les machines frigorifiques et tous les autres composants (p. ex. l'aéroréfrigérant) doivent être inclus pour assurer une haute disponibilité de la climatisation de confort. Dans la perspective du système global, une évaluation individuelle des risques doit être effectuée pour chaque composant.
6. Le générateur doit être conçu pour la puissance réelle requise et non surdimensionné. La puissance frigorifique est déterminée par les charges de refroidissement externes et internes ainsi que par les charges de refroidissement latentes (cachées).
7. La machine frigorifique fonctionne la plupart du temps en plage de charge partielle. Lors de l'évaluation de différentes offres, les informations sur le comportement en charge partielle doivent être documentées et comparées.
8. Une attention suffisante doit être accordée à des questions telles que l'inflammabilité (fluides frigorigènes) ou le bruit (celui des compresseurs, condenseurs, aéroréfrigérants secs).
9. Une mise en service soignée, un réajustement après 300 heures et une optimisation du fonctionnement après la première année d'exploitation constituent la base d'un système économique et écologique.
10. Grâce à une conception intelligente du bâtiment, il est très souvent possible d'obtenir une atmosphère intérieure agréable sans refroidissement actif, c'est-à-dire sans installations frigorifiques.

# Types de construction et composants

La machine frigorifique est le cœur de l'installation de refroidissement. Le planificateur connaît les paramètres d'un bon système et peut demander au fournisseur des spécifications appropriées. Et il sait comment contrôler les paramètres après la mise en service. Cependant, le planificateur n'est pas responsable de la définition et de la conception des composants individuels de la machine frigorifique.

## 5.1 Le circuit frigorifique et ses composants

Les principaux composants du circuit frigorifique d'une machine frigorifique à compression sont les suivants:

- le compresseur
- l'échangeur de chaleur
  - le condenseur
  - l'évaporateur
- le détendeur

Le système est complété par d'autres composants tels qu'un voyant, un filtre et un réservoir.

### Remarque sur les conduites

Afin de minimiser les pertes de froid dans une machine frigorifique et éviter la condensation de l'humidité sur les conduites froides, la conduite d'aspiration doit être pourvue d'une isolation fri-

gorifique. Pour les machines avec récupération de chaleur, l'isolation de la conduite de refoulement et du condenseur est également nécessaire.

## 5.2 Les types de compresseurs et leur fonction

Le compresseur aspire le fluide frigorigène sous forme gazeuse issue de l'évaporation et le comprime à la pression nécessaire pour assurer sa condensation. Différentes technologies sont utilisées pour la compression:

Les principaux types de compresseurs sont résumés dans l'illustration 5.2. Les types colorés (à pistons, à spirales, à double vis, turbo) sont couramment utilisés en climatisation.

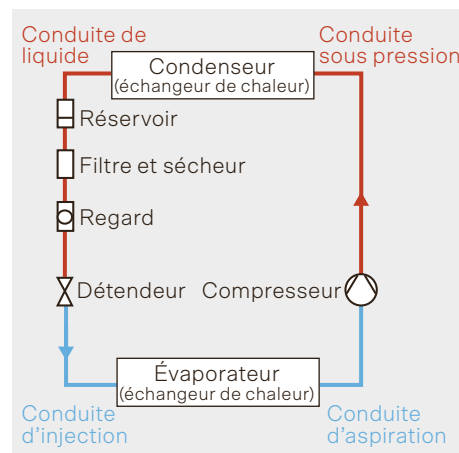


Illustration 5.1: Le circuit frigorifique et les principaux composants d'une installation frigorifique à évaporation directe et à condensation directe.

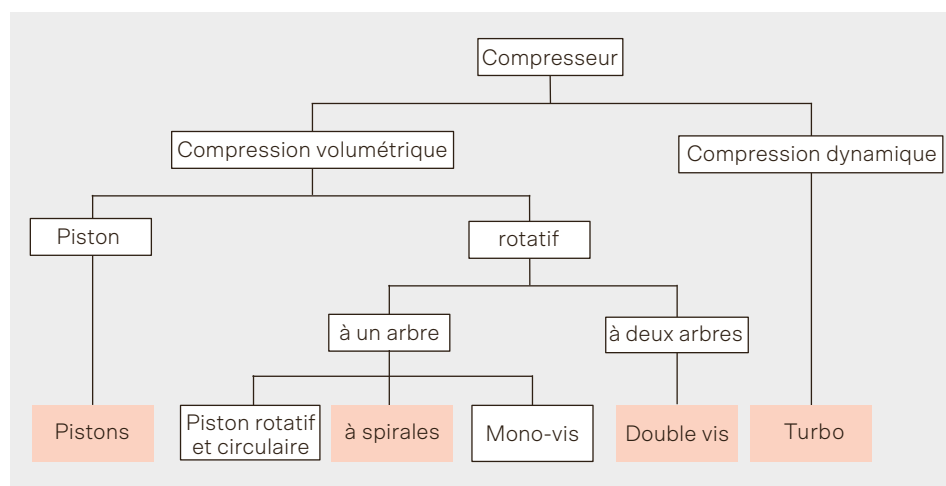


Illustration 5.2: Les compresseurs selon leur principe de fonctionnement. Les compresseurs colorés sont les plus couramment rencontrés dans la réfrigération de la climatisation.

**Compresseur à pistons**

Les compresseurs à pistons sont universellement applicables et sont utilisés dans la climatisation dans la gamme des petites et moyennes puissances. Ils conviennent également pour surmonter les grandes différences de pression entre la condensation et l'évaporation, comme c'est le cas, p. ex., dans l'utilisation de la chaleur pour le chauffage de l'eau. En outre, ils se caractérisent par un bon rendement à pleine charge. Dans la plage de charge partielle – avec une puissance réduite – ils sont modérément efficaces.



Illustration 5.3: Compresseur à pistons semi-hermétique (Photo: Bitzer)

**Compresseur à spirales**

Dans un compresseur à spirales, deux spirales montées de manière excentrique rétrécissent de plus en plus l'espace interstitiel. Le fluide frigorigène qui se trouve dans l'espace intermédiaire est ainsi pressé au centre et comprimé. La puissance frigorifique est contrôlée par la mise en marche et l'arrêt de chaque compresseur (machine multi-compresseur). Les machines frigorifiques équipées de compresseurs à spirales constituent une solution économique dans la gamme de puissance frigorifique de 30 à 300 kW.



Illustration 5.4: Compresseur hermétique à spirales. (Photo: Emerson Climate Technologies GmbH)

**Compresseur à vis**

On utilise principalement un compresseur à deux vis. Un boîtier contient deux rotors parallèles, couplés mécaniquement par la force, avec des dents hélicoïdales qui s'engrènent. L'espace libre entre les flancs de la vis devient de plus en plus petit dans le sens du refoulement, ce qui crée une pression. De l'huile est injectée entre les vis pour réduire la friction et le reflux.

Le compresseur à vis non régulé fonctionne avec un rapport de pression constant. Afin d'adapter le fonctionnement du compresseur aux conditions d'exploitation, une régulation appropriée est nécessaire.

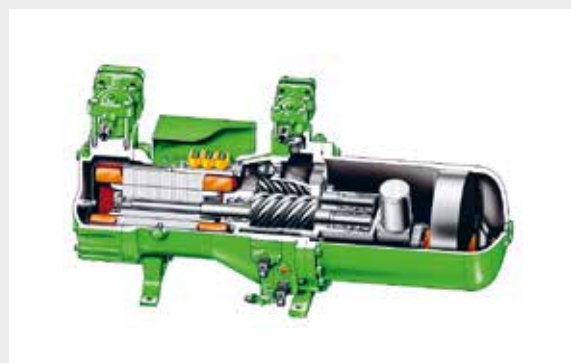


Illustration 5.5: Compresseur à vis semi-hermétique. (Photo: Bitzer)

**Turbocompresseur**

Dans le turbocompresseur, le gaz entrant dans la roue à aube est accéléré vers l'extérieur par le mouvement rotatif du rotor. La vitesse diminue et la pression augmente. L'énergie dynamique est ensuite convertie en pression dans le diffuseur. Pour plus de détails sur le comportement et l'utilisation des turbocompresseurs, voir l'annexe (Chapitre 11.3, Approfondissement 1: Turbocompresseur).



Illustration 5.6: Turbocompresseur. (Photo: Turbocor)

### Propriétés des différents compresseurs

L'illustration 5.7 énumère les principales caractéristiques avec des données de puissance approximatives pour une utilisation dans le domaine de la climatisation. Tous les types de compresseurs ne peuvent pas être utilisés sur l'ensemble de la plage de puissance. En outre, ils diffèrent par la plage de température possible (différence entre la température de condensation et d'évaporation).

Illustration 5.7:  
Propriétés des différents types de compresseurs.

Type de compresseur	Pistons	Scroll	Vis	Turbo
<b>Utilisation</b>	petites à moyennes puissances	petites à moyennes puissances	moyennes à grandes puissances	de 200 kW à très grandes puissances
Puissance frigorifique du compresseur	jusqu'à 500 kW	jusqu'à 90 kW	jusqu'à 800 kW	à partir de 250 kW
Puissance frigorifique de la machine frigorifique	jusqu'à 1000 kW	jusqu'à 300 kW	jusqu'à 6000 kW	200 kW – 30 MW
<b>Possibilité de régulation</b>				
à vitesse de rotation constante	étapes avec arrêt du cylindre	uniquement scroll numérique: possible en continu	en continu avec vanne ou régulation par dérivation	en continu avec étranglement d'aspiration
avec régulation de la vitesse de rotation env. <sup>3</sup>	50 % – 100 %	20 % – 100 %	20 % – 100 %	25 % – 100 %
<b>Possibilité d'utilisation de la chaleur avec un chauffage au gaz chaud</b>	oui (env. 10 % de la puissance)	oui (env. 10 % de la puissance)	sous condition	non
Plage de température (env.) <sup>1</sup>	0 °C – 65 °C	0 °C – 65 °C	0 °C – 65 °C	0 °C – 50 °C
<b>Courant de démarrage</b> <sup>2</sup>	courant de déclenchement relativement élevé	faible	moyen	moyen
<b>Provoque des vibrations</b>	oui	non	non	non
<b>Maintenance</b>	maintenance simple		travaux de maintenance plus importants uniquement possibles dans un atelier spécial	maintenance relativement simple par des spécialistes
<b>Divers</b>	tenir compte des pulsions			

<sup>1</sup> Évaporation sur condensation

<sup>2</sup> Sans régulation de la vitesse de rotation env.

<sup>3</sup> La vitesse minimale (pour les compresseurs lubrifiés à l'huile) dépend du retour d'huile. Une vitesse trop faible entraîne une lubrification insuffisante (panne de pression d'huile).

### 5.3 Comportement du compresseur

Les températures d'évaporation et de condensation ont une grande influence sur la puissance et l'efficacité du compresseur. Plus les températures d'évaporation et de condensation sont rapprochées, plus le compresseur est efficace et puissant. L'exemple d'un compresseur à pistons illustre ce point (Illustr. 5.8).

Illustration 5.8: Diagramme de puissance d'un compresseur à pistons en fonction de la température d'évaporation  $T_e$  et de la température de condensation  $T_c$ .

**Plage de température 60 K:** À une température de condensation de 60 °C et une température d'évaporation de 0 °C, le compresseur de l'exemple a une puissance de 75 kW ( $P_{1_{60K}}$ ) et un coefficient de performance de 2 ( $P_{2_{60K}}$ ).

**Plage de température 20 K:** Lorsque la température de condensation tombe à 30 °C et que, simultanément, la température d'évaporation peut être portée à 10 °C, la puissance frigorifique du compresseur passe à 175 kW ( $P_{1_{20K}}$ ) et le coefficient de performance à 6 ( $P_{2_{20K}}$ ).

Il est donc important de maintenir la différence de température entre la condensation et l'évaporation aussi faible que possible et de conserver ainsi l'efficacité énergétique de l'installation. Ce principe s'applique à tous les types de compresseurs car il est déterminé par le processus de refroidissement et non par le compresseur (voir également Chap. 3.3).

#### Possibilités de régulation des compresseurs

La puissance de refroidissement de tous les compresseurs peut être modifiée grâce à la régulation de la vitesse de rotation. Elle se caractérise par une efficacité énergétique optimale et une usure réduite (coûts d'entretien moindres). Cependant, le prix de l'installation est plus élevé.

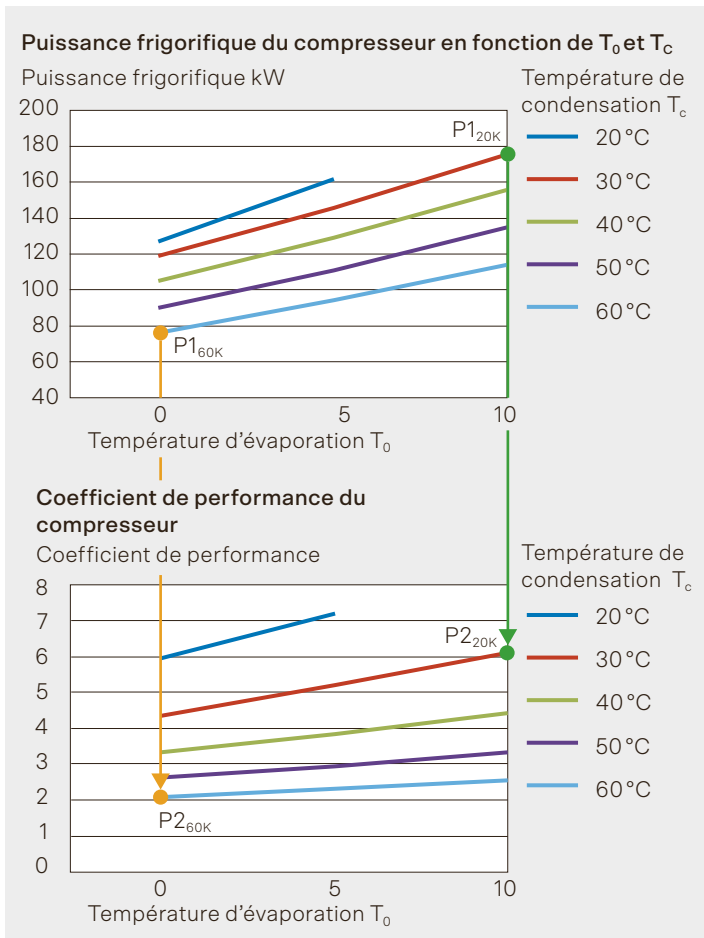
Dans ce qui suit, diverses options de régulation supplémentaires sont décrites, avec lesquelles les performances de la machine peuvent être modifiées mécaniquement à vitesse de rotation constante.

#### Désactivation des cylindres

S'applique uniquement aux compresseurs à pistons: Avec cette régulation, la vanne d'aspiration est maintenue ouverte mécaniquement sur un ou plusieurs cylindres. Le mouvement du piston aspire le gaz de la conduite d'aspiration et le repousse ensuite. En conséquence, le cylindre devient inactif et la puissance diminue en raison de la réduction du débit massique total. Dans le même temps, cependant, les pertes mécaniques subsistent. La plage de régulation par compresseur dépend du nombre de cylindres et de la conception du compresseur. Elle se situe approximativement entre 50 et 100%, une régulation simple mais moyennement efficace.

#### Interruption brève du refoulement (Digital-Scroll)

Avec un compresseur «digital», la compression du fluide frigorigène sous forme



gazeuse, par une interruption brève du refoulement (régulation PWM, Pulse Width Modulation, soit modulation de largeur d'impulsion). En raison des pertes mécaniques, ce type de régulation n'est pas très efficace et provoque des fluctuations de pression du côté du refoulement.

#### Régulation par tiroir/bypass

Dans le cas des compresseurs à vis, la puissance est ajustée à la demande à l'aide d'un tiroir ou d'une régulation par dérivation (bypass).

Le tiroir permet, de par son déplacement, de modifier la longueur effective utilisable pour la compression. L'installation d'une régulation par tiroir, notamment en exécution parallèle ou tandem, affaiblit la construction du compresseur et nécessite par conséquent un boîtier robuste. Dans la plage de puissance comprise entre 100 et 50 %, cette régulation permet d'obtenir une bonne efficacité énergétique. En fonctionnement à charge partielle (en dessous de 50 %), l'efficacité énergétique diminue de manière significative. Les compresseurs à vis régulés par une dérivation présentent une solution plus économique, mais au détriment de l'efficacité.

#### Régulation par étranglement de l'aspiration

Avec les turbocompresseurs, la puissance du compresseur peut être réduite en réduisant le débit du fluide frigorigène. Pour ce faire, les aubes directrices à l'en-

trée du compresseur sont ajustées. Le rendement du compresseur diminue alors régulièrement. La régulation optimale et énergétiquement efficace en énergie est obtenue par la régulation de la limitation d'aspiration en combinaison avec la régulation de la vitesse de rotation.

#### Régulation de vitesse de rotation des compresseurs à déplacement positif

L'augmentation de la vitesse de rotation engendre un plus grand transport de la masse de fluide frigorigène par seconde. L'augmentation du débit massique du fluide frigorigène entraîne une augmentation de la puissance frigorifique (voir Chap. Bases). La réduction de la vitesse de rotation réduit le débit massique du fluide frigorigène en conséquence. La pression de sortie ne change pas, car elle dépend de la géométrie de la chambre de compression.

#### Régulation de vitesse de rotation des compresseurs centrifuges

L'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation simultanée du débit massique et de la pression de refoulement par déplacement de la courbe du compresseur. La réduction de la vitesse réduit la pression et le débit massique en conséquence. Tant pour l'augmentation que pour la diminution, il existe des limites d'exploitation pour la fonction de débit du compresseur, au-delà de laquelle, aucune exploitation n'est plus possible.

Illustration 5.9:  
Régulation avec  
vanne parallèle, resp.  
tandem.

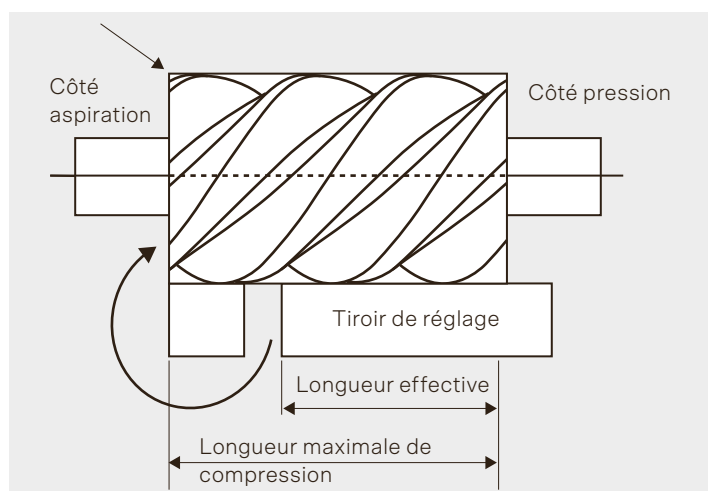
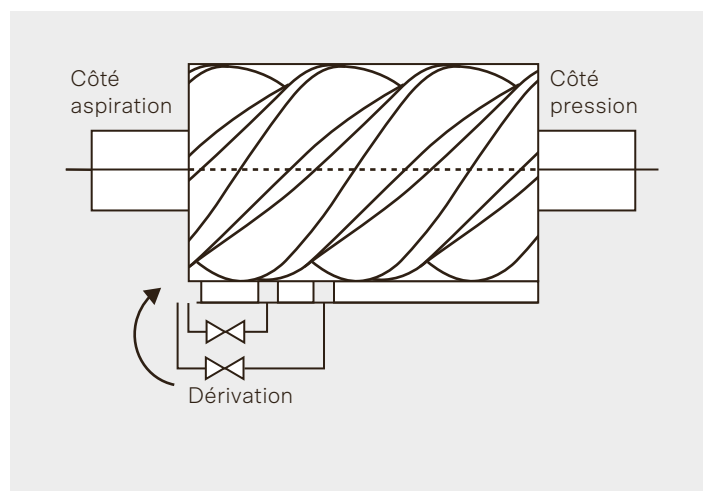


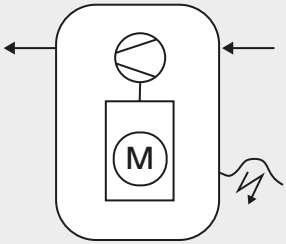
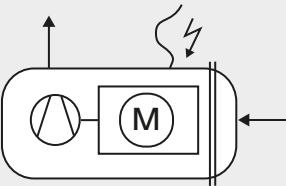
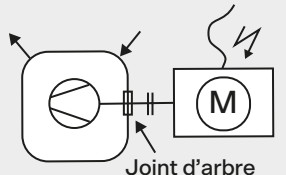
Illustration 5.10:  
Compresseur à vis  
avec régulation par  
dérivation.





## 5.4 Types de construction des compresseurs

Différents types de construction des compresseurs sont utilisés en fonction de l'application et des coûts induits. Ils diffèrent par la façon dont le compresseur et l'entraînement sont assemblés. Aperçu des caractéristiques, avantages et inconvénients des différents types de construction des compresseurs:

Compresseur complètement hermétique	Compresseur semi-hermétique	Compresseur ouvert
<p>Dans les machines entièrement hermétiques, le compresseur et le moteur électrique forment une unité autonome (soudée de manière étanche).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte de fluide frigorigène</li> <li>- Refroidissement du moteur par le fluide frigorigène, augmentation de la température d'évaporation possible que dans une mesure limitée</li> <li>- Petit moteur, car directement refroidi</li> <li>- Petites unités, non réparables</li> <li>- Plage de puissance des compresseurs hermétiques: jusqu'à env. 100 kW de puissance frigorifique</li> </ul>	<p>Dans les machines semi-hermétiques, le compresseur et le moteur sont assemblés et accessibles. Cela rend la réparation possible.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte de fluide frigorigène</li> <li>- Refroidissement du moteur par le fluide frigorigène, la chaleur perdue est évacuée directement avec le fluide.</li> <li>- Rendement élevé du moteur, petit moteur, augmentation de la température d'évaporation possible uniquement de manière limitée.</li> <li>- Petites et moyennes unités</li> <li>- Coûts éventuellement élevés en cas de dommages au moteur</li> <li>- Plage de puissance des compresseurs semi-hermétiques: env. de 50 à 500 kW de puissance frigorifique</li> </ul>	<p>Dans les machines ouvertes, le compresseur et le moteur sont séparés l'un de l'autre. Ce système est principalement utilisé pour les puissances plus élevées et les applications avec ammoniac. (le <math>\text{NH}_3</math> attaquerait les enroulements en cuivre).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Risque de perte de fluide frigorigène par le presse-étoupe du compresseur</li> <li>- Plusieurs entraînements peuvent être utilisés</li> <li>- Le moteur dégage de la chaleur dans l'environnement</li> <li>- Réparable</li> <li>- Bien adapté aux applications frigorifiques industrielles</li> </ul>
		
Illustration 5.11: Compresseur entièrement hermétique.	Illustration 5.12: Compresseur semi-hermétique.	Illustration 5.13: Compresseur ouvert.

### Aspects de l'alimentation électrique

Avec les moteurs électriques branchés directement, l'intensité du courant de démarrage est environ six fois supérieure à celle du courant nominal. Cette pointe de puissance n'est pas acceptable par le réseau. Pour la compagnie d'électricité, le démarrage direct n'est donc autorisé que pour les petits moteurs d'une puissance d'entraînement de 3 à 5 kW.

Le problème des courants de démarrage élevés peut être résolu avec un convertisseur de fréquence. Malheureusement, tous les maîtres d'ouvrage ne sont pas prêts à investir dans un convertisseur de fréquence.

Pour les machines frigorifiques sans convertisseur de fréquence, les conditions générales de l'installation influencent le choix de la méthode de démarrage ou le principe de fonctionnement du compresseur.

### Régulation de vitesse de rotation

Lors de la régulation de la vitesse de rotation avec un convertisseur de fréquence, il faut tenir compte de deux phénomènes en particulier:

- **La vitesse critique:** En principe, les convertisseurs de fréquence permettent n'importe quelle vitesse. Cependant, pour des raisons de dynamique de la machine, les vitesses doivent être coordonnées avec la machine connectée. En cas d'utilisation d'un convertisseur de fréquence pour entraîner le compresseur, le fournis-

seur de ce dernier spécifie donc les vitesses critiques prohibées pour le fonctionnement en continu du compresseur. Celles-ci peuvent provoquer des vibrations indésirables et finalement endommager l'appareil.

Le fournisseur de la machine doit veiller à ce que le système de commande élimine ces variations de vitesse. Pour des raisons de responsabilité, il est donc conseillé d'intégrer le convertisseur de fréquence dans la machine.

- **Les harmoniques:** L'utilisation d'un convertisseur de fréquence peut provoquer la propagation d'harmoniques dans le réseau électrique. Celles-ci doivent être annulées à l'aide d'un filtre ou de bobines d'arrêt fournies avec la machine. Sinon, ils peuvent provoquer des perturbations dans le réseau électrique.

### Coordination avec le planificateur électrique

Dans la phase de projet, le planificateur d'installations frigorifiques doit clarifier les aspects électriques suivants en collaboration avec le constructeur de la machine frigorifique et l'ingénieur électrique:

- Type de démarrage
- Courant de démarrage et courant nominal
- Prescriptions de la compagnie d'électricité et
- Contrôle du convertisseur de fréquence (s'il est prévu).

Illustration 5.14:  
Modes de démarrage des moteurs de compresseurs.

Type de démarrage	Courant de démarrage	Cadre financier approximatif		Remarque
		20 kW électrique	100 kW électrique	
Direct	env. 6 fois	aucun	-	En règle générale, uniquement possible sur le plan électrique pour les compresseurs d'une puissance allant jusqu'à 3 à 5 kW.
Triangle-étoile	env. 2 fois	1000 Fr.	2000 Fr.	Pour les machines standard, le contacteur triangle-étoile est inclus dans l'installation de démarrage. Sinon, demander au planificateur électrique de le fournir
Démarrage par enroulements fractionnés	2 à 3 fois	1000 Fr. + Plus-value moteur	2000 Fr. + Plus-value moteur	Nécessite un moteur spécial. Protection similaire à un interrupteur triangle-étoile
Convertisseur de fréquence	pas de courant de démarrage supérieur	3000 Fr.	7000 Fr.	Le CF est généralement fourni avec la machine par son fabricant.

## 5.5 Généralités sur les échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans la machine frigorifique, tant du côté de l'évaporateur que de celui du condenseur. Selon le système, différents types d'échangeurs sont utilisés.

Les **échangeurs de chaleur** multitubulaires destinés au transfert de chaleur de médiums liquides et parfois gazeux sont constitués d'un faisceau de tubes dans une enveloppe dénommée calandre. Ils se caractérisent par une grande diversité de matériaux et une moindre sensibilité à la saleté.

**Échangeurs de chaleur à plaques:** Construction compacte, brasée ou soudée, pour le transfert de chaleur de médiums liquides et, dans certaines applications, gazeux. Ils présentent l'avantage de faibles contenus, de grandes surfaces de transfert dans un espace réduit et d'un haut degré de modularité dans la fabrication. Cependant, ils ne sont pas adaptés aux médiums souillés. Les **échangeurs de chaleur coaxiaux** sont constitués d'un double tube plié en

hélice, généralement en cuivre. Ils sont principalement utilisés dans les plus petits systèmes.

Les **échangeurs de chaleur à ailettes** sont constitués d'un ou plusieurs tubes parallèles avec des ailettes pressées. Ils conviennent au transfert de chaleur des milieux gazeux (p.ex. l'air). Diverses combinaisons de matériaux et de branchements sont possibles. Une attention particulière doit être accordée à la distance entre les ailettes, car les souillures, le givrage etc. peuvent entraîner des pertes de puissance importantes.

Les **échangeurs de chaleur à registre** se composent de serpentins ou de paquets de plaques de différentes qualités de matériaux, intégrés dans des récipients ouverts ou fermés. Ils ne sont utilisés dans la climatisation que pour des applications spéciales – notamment pour les médiums fortement souillés. Les

### Obligation d'informer la SUVA

Les appareils de pression (p.ex. échangeurs de chaleur) d'une certaine taille doivent être soumis à un contrôle périodique. Ils doivent être signalés à la SUVA avant leur première utilisation et en cas de modification importante. Le propriétaire de l'installation est responsable de la déclaration. En règle générale, le propriétaire délègue la déclaration au planificateur ou au fournisseur. L'ASIT (Association suisse d'inspection technique) effectue les contrôles pour la SUVA. L'Ordonnance relative à l'utilisation des équipements sous pression et la directive CFST<sup>1</sup> «Équipements sous pression» décrivent toutes les informations importantes relatives à l'utilisation des équipements sous pression. Cette inspection par l'ASIT augmente les coûts d'exploitation de l'installation, ce qui doit être pris en compte lors de l'évaluation des coûts totaux.

<sup>1</sup> CFST: Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail

Illustration 5.15:  
Échangeur de chaleur à faisceaux de tubes. (Photo: Bitzer)



Illustration 5.16:  
Échangeurs de chaleur à plaques. (Photo: BMS)



échangeurs de chaleur à registre ne sont normalement utilisés que comme évaporateurs.

**Différences de température à atteindre**

Lors du dimensionnement des échangeurs de chaleur, le planificateur est confronté au défi d’assurer un transfert d’énergie optimal sans que la consommation supplémentaire des unités auxiliaires telles que les pompes et les ventilateurs soit trop importante. Dans le même temps, l’investissement doit res-

ter dans des limites raisonnables. Les différences de température pour les types d’échangeurs de chaleur courants peuvent être utilisées comme ligne directrice pour le dimensionnement (Illustr. 5.17).

**1 Évaporateur (refroidisseur)**

1.1 Refroidisseur d’air	<b>Différence de température <math>dT = T_{\text{Air}}</math> (entrée évaporateur) – <math>T_0</math> (température d’évaporation)</b>			
	<b>Échangeur thermique</b>	<b>Méthode</b>	<b>dT autorisé</b>	<b>dT à cibler</b>
	Lamelles	à sec	$\leq 10 \text{ K}^1$	$\leq 7 \text{ K}^2$
	Lamelles	par immersion	$\leq 8 \text{ K}$	$\leq 5 \text{ K}$

1.2 Refroidisseur de liquide	<b>Différence de température <math>dT = T_{\text{fluide frigoporteur}}</math> (sortie évaporateur) – <math>T_0</math> (température d’évaporation)</b>			
	<b>Échangeur thermique</b>	<b>Méthode</b>	<b>dT autorisé</b>	<b>dT à cibler</b>
	Plaques	à sec	$\leq 6 \text{ K}$	$\leq 2 \text{ à } 4 \text{ K}$
	Calandre	à sec ou par immersion	$\leq 5 \text{ K}$	$\leq 3 \text{ K}$

**2 Condenseur**

2.1 Sec, Air	<b>Différence de température <math>dT = T_{\text{Air}}</math> (entrée condenseur) – <math>T_c</math> (température de condensation)</b>			
	<b>Échangeur thermique</b>	<b>Méthode</b>	<b>dT autorisé</b>	<b>dT à cibler</b>
	Lamelles	à sec	$\leq 13 \text{ K}$	$\leq 8 \text{ K}$

2.2 Refroidi par liquide	<b>Différence de température <math>dT = T_{\text{caloporteur}}</math> (sortie condenseur) – <math>T_c</math> (température de condensation)</b>			
	<b>Échangeur thermique</b>	<b>Méthode</b>	<b>dT autorisé</b>	<b>dT à cibler</b>
	Plaques	refroidi par liquide	$\leq 5 \text{ K}$	$\leq 1 \text{ à } 2 \text{ K}$
	Calandre	refroidi par liquide		$\leq 2 \text{ K}$

<sup>1</sup> à détendeur thermostatique <sup>2</sup> à détendeur électronique

Illustration 5.17:  
Différences de température à viser dans les échangeurs de chaleur. (Source: Guide de mesures pour l’optimisation des installations frigorifiques, OFEN 2012, sur la base des informations du VDMA 24247-8)

### Encrassement et vieillissement des échangeurs de chaleur

Dans un échangeur de chaleur neuf, les surfaces sont propres et le transfert de chaleur est optimal. Cependant, au fil du temps, l'échangeur de chaleur s'encrasse et ses performances diminuent. L'encrassement est dû à des dépôts solides ou à un biofilm. Dans les systèmes ouverts, l'encrassement vient de l'extérieur.

L'exemple d'un condenseur avec de l'ammoniac comme fluide frigorigène montre comment les températures sont influencées par la saleté, ce qui fait passer la température de condensation de 40 à 45 °C. En conséquence, la pression de condensation augmente de 2,3 bars, ce qui augmente la consommation d'énergie d'environ 15 % à  $T_0 = 10\text{ °C}$ !

Dans une machine frigorifique dont les échangeurs de chaleur sont souillés, le coefficient de performance et la puissance frigorifique diminuent en même temps.

Lors de l'achat d'une production frigorifique, il est essentiel pour le planificateur de préciser au fournisseur le facteur d'encrassement (Fouling Factor FF). Il

tient alors compte de la résistance supplémentaire au transfert de chaleur due à l'encrassement autorisé. Le fournisseur de la machine doit confirmer au planificateur que les échangeurs de chaleur (et donc la machine frigorifique) ont été dimensionnés pour l'encrassement prévisible et resteront opérationnels même en sa présence (risque de dysfonctionnement de la haute pression).

### À prendre en compte impérativement

- Lorsque l'on compare différentes offres, il est obligatoire de tenir compte du même facteur d'encrassement.
- La norme SIA 382/1 (2014) suppose une valeur de pollution (théorique) de  $0\text{ m}^2\text{ K/W}$  lors du calcul des conditions standard des besoins énergétiques des systèmes de refroidissement par eau.

L'illustration 5.19 montre des exemples pour la détermination du facteur d'encrassement FF.

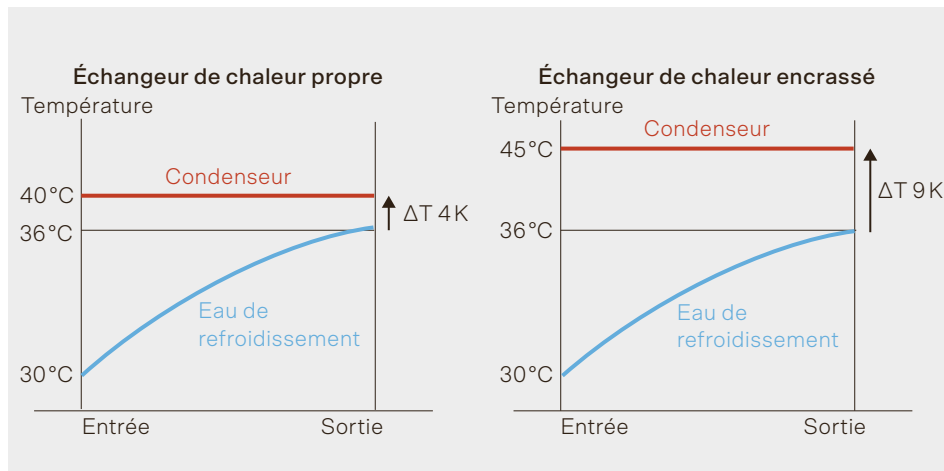


Illustration 5.18: Effet de l'encrassement sur l'efficacité énergétique.

Illustration 5.19: Encrassement des échangeurs de chaleur et facteur d'encrassement.

FF* $\text{m}^2\text{K/kW}$	FF $\text{m}^2\text{K/W}$	Description
0,01	0,00001	Appareils propres
0,044	0,000044	Légèrement encrassés (circuits fermés)
0,088	0,000088	Circuits ouverts, propres
0,136	0,000136	Circuits ouverts, encrassés
0,172	0,000172	Circuits ouverts, fortement encrassés (p. ex. algues, dépôts)

\* Facteur d'encrassement (Fouling factor FF)

## 5.6 Évaporateur

Dans l'évaporateur, la chaleur est extraite de l'environnement (air, eau, saumure etc.). Le fluide frigorigène absorbe cette chaleur et s'évapore. Il faut distinguer les évaporateurs à détente sèche des évaporateurs noyés, et il existe également des combinaisons de ces deux variantes.

### Évaporateur multitubulaire à détente sèche

Dans la détente sèche, le fluide frigorigène est injecté dans l'échangeur de chaleur de manière à ce qu'il se trouve sous forme de vapeur (sec) à la sortie. Pour ce faire, une surchauffe de 5 à 7 K est nécessaire. Le fluide frigorigène est acheminé vers l'évaporateur par l'intermédiaire d'un détendeur. La quantité de fluide frigorigène est régulée par la différence entre la température du gaz et la température de saturation (surchauffe du gaz d'aspiration). À la sortie de l'évaporateur, le gaz frigorigène est surchauffé et donc sec.

Dans un évaporateur multitubulaire à détente sèche, le médium refroidi se trouve dans la calandre. Le transfert de chaleur est amélioré par la déviation du flux à travers des chicanes.

L'évaporateur multitubulaire et l'évaporateur à plaques à détente sèche ne doivent pas être utilisés pour les médiums fortement souillés (comme les circuits ouverts dans l'industrie). Le nettoyage mécanique n'étant pas possible, l'appareil ne peut être nettoyé que chimiquement.

### Évaporateur multitubulaire noyé

Dans l'échangeur de chaleur noyé, le fluide frigorigène se trouve dans la partie inférieure de la calandre (entrée). Il est aspiré sous forme gazeuse dans la zone supérieure. Avec la séparation par gravité, seule une petite surchauffe du gaz d'aspiration est nécessaire (0,5–1,0 K), ce qui exerce un effet positif sur l'efficacité énergétique de l'installation.

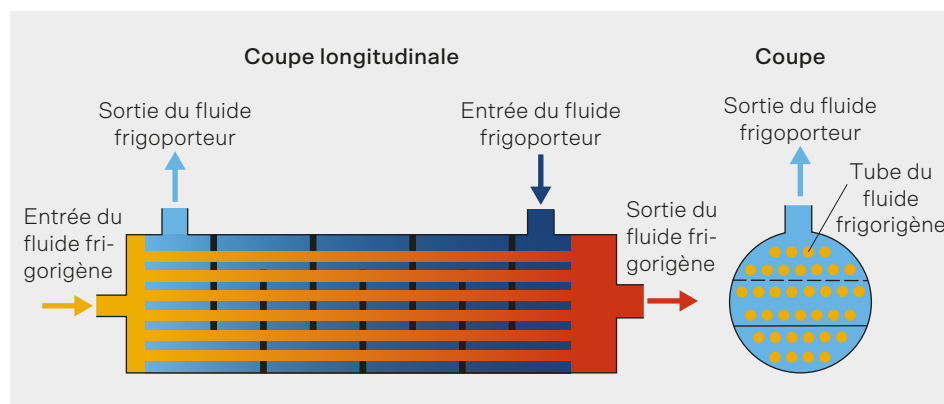


Illustration 5.20: Évaporateur à détente sèche à faisceau tubulaire. (Source: vpro)

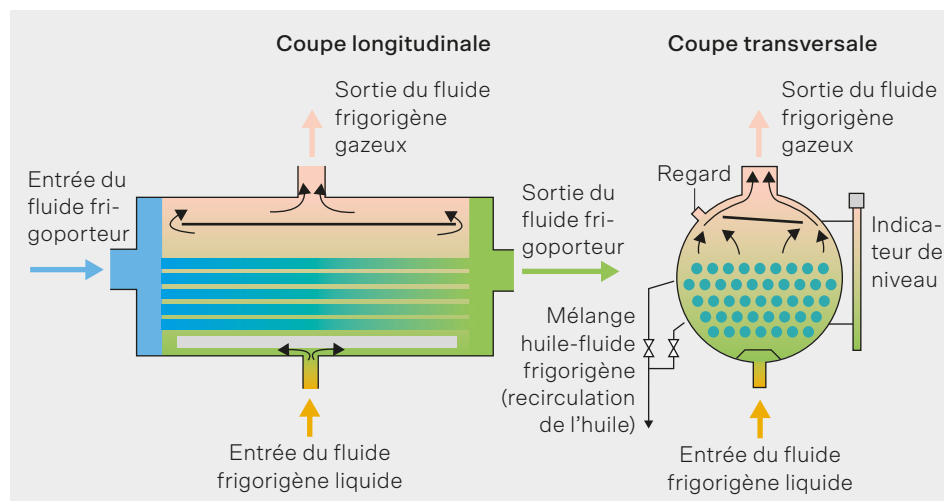


Illustration 5.21: Évaporateur à faisceau tubulaire noyé. (Source: vpro)

L'inconvénient de cette solution est a nécessité d'un remplissage de fluide plus important (respecter la quantité de fluide frigorigène admissible selon ORRChim). En revanche, l'utilisation d'échangeurs de chaleur à plaques permet de réduire la quantité de fluide frigorigène.

Le fluide frigorigène est introduit par le bas dans la calandre de l'évaporateur via un régulateur à flotteur haute ou basse pression. La quantité de fluide frigorigène est contrôlée par le niveau de liquide du côté haute ou basse pression. À la sortie de l'évaporateur (en haut), le gaz frigorigène n'est que légèrement surchauffé. À des puissances élevées, le fluide frigorigène de l'unité bout très fortement. Pour empêcher les gouttes de fluide frigorigène de pénétrer dans la conduite d'aspiration du compresseur, un séparateur de liquide est généralement installé dans la partie supérieure du manteau.

Le principal avantage de l'évaporateur noyé est de permettre de petites différences de température entre le fluide frigorigène et le côté médium lorsque la surface de transfert de chaleur est suffisante, c'est-à-dire que la température d'évaporation peut être dimensionnée plus élevée. Cela s'applique en particulier à la plage de charge partielle. Le résultat est un meilleur rendement et donc une meilleure efficacité énergétique du système global.

L'évaporateur illustré est une unité à passage unique (le médium circule sur un trajet de gauche à droite).

### Refroidisseur d'air (évaporateur direct)

Un évaporateur à air direct peut être utilisé pour le refroidissement de l'air, par exemple dans une unité de ventilation. Avec les fluides frigorigènes synthétiques, le fluide est acheminé dans des tuyaux en cuivre avec des ailettes en aluminium. L'écartement des ailettes est de 1 à 2 mm pour l'air propre; pour les médiums encrassés, l'écartement doit être porté à 4 mm afin de pouvoir nettoyer les ailettes.

Pour que la stratification de la température à la sortie du refroidisseur soit aussi faible que possible, le mélange fluide-gaz frigorigène est réparti aux différents tronçons de tuyaux avec des tubes capillaires individuels via un distributeur liquide.

Selon les conditions de fonctionnement et le degré d'encrassement, les ailettes doivent être nettoyées régulièrement.

### Différence entre une détente sèche et un évaporateur noyé, illustrée à l'aide de l'exemple d'un échangeur de chaleur à plaques.

Pour une même différence de température entre l'entrée du médium et la sortie du fluide frigorigène (=), la température d'évaporation de l'évaporateur à détente sèche est inférieure de plusieurs K à celle de l'évaporateur noyé (Illustr. 5.23). La raison en est la plus grande surchauffe du fluide frigorigène requise. Cela a un effet négatif sur l'efficacité énergétique de l'installation.



Illustration 5.22:  
Échangeur de chaleur à lamelles utilisé comme évaporateur.

Comparaison des types d'évaporateurs à l'exemple d'un appareil à enveloppe et à tube		
Principe	Évaporateur à détente	Évaporateur noyé
<b>Caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le fluide frigorigène se trouve dans les tubes.</li> <li>- L'huile circule dans le circuit (à charge partielle inférieure à 50 %, il est nécessaire de le diviser en plusieurs circuits).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le fluide frigorigène se trouve dans la calandre.</li> <li>- Avec de l'huile dans le circuit de froid (compresseurs lubrifiés à l'huile).</li> </ul>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Remplissage de fluide frigorigène plus faible</li> <li>+ L'huile est inévitablement aussi véhiculée</li> <li>+ Prix plus bas de la machine frigorifique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Coefficient de performance plus élevé</li> <li>+ Petite surchauffe du gaz d'aspiration (0,5 – 1,0 K)</li> <li>+ Un débit uniforme dans les tubes avec une faible perte de charge</li> <li>+ Températures de sortie plus basses (jusqu'à 3 °C)</li> <li>+ Débit volumique variable généralement autorisé</li> </ul> <p>Pour les évaporateurs tubulaires:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Peut être nettoyé mécaniquement du côté du fluide (évent. avec un système de nettoyage des tubes)</li> <li>+ Évaporation visible, mesure du niveau mesurable</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coefficient de performance plus bas</li> <li>- Surchauffe du gaz d'aspiration env. 5 – 8 K requis</li> <li>- Nettoyage mécanique impossible</li> <li>- Sécurité opérationnelle accrue dans les installations à plusieurs circuits</li> <li>- Risque de gel dans les coins de l'évaporateur (lorsque l'évaporation est proche de 0 °C)</li> <li>- Températures minimales de sortie: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluide frigorigène sans lubrifiant 6 °C</li> <li>- Fluide frigorigène avec lubrifiant 8 °C</li> </ul> </li> <li>- Danger de coup de liquide en cas de surchauffe insuffisante</li> <li>- Débit volumique constant requis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantité de remplissage en fluide frigorigène plus importante</li> <li>- Recirculation d'huile coûteuse (si nécessaire)</li> <li>- Prix plus élevé de la machine frigorifique</li> <li>- Nécessité d'une grande surface d'échangeur de chaleur et d'un espace de séparation (= coûteux)</li> <li>- Ne convient pas aux mélanges de fluides frigorigènes avec glissement (glide, fluides frigorigènes zéotropiques)</li> </ul>
<b>Températures du système à l'exemple d'un évaporateur à plaques</b>	<p>Surchauffe env. 7K</p> <p><math>T_{F-Ent}</math> 16 °C</p> <p><math>T_{F-Sor}</math> 10 °C</p> <p><math>T_0</math></p> <p>Évaporateur à détente sèche</p>	<p>Surchauffe env. 0,5K</p> <p><math>T_0</math></p> <p><math>T_{F-Sor}</math> 10 °C</p> <p><math>T_0</math> = Température d'évaporation</p> <p>Évaporateur noyé</p>

Illustration 5.23: Caractéristiques, avantages et inconvénients des évaporateurs à détente sèche et noyés.



### 5.7 Condenseur

Dans le condenseur, la chaleur absorbée dans l'évaporateur – plus l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur – est à nouveau restituée.

#### Condenseur multitubulaire

Le gaz frigorigène provenant du compresseur est désurchauffé dans la calandre de l'échangeur de chaleur, liquéfié et, selon la conception, également sous-refroidi.

La chaleur peut également être évacuée via plusieurs échangeurs de chaleur et donc à différents niveaux de température. Cette application avec désurchauffeur, condenseur et sous-refroidisseur permet d'améliorer l'efficacité énergétique de l'installation (voir l'illustr. 5.25).

Dans la partie supérieure, la chaleur de désurchauffe est utilisée, par exemple pour l'eau chaude sanitaire (ECS), dans la partie centrale, la chaleur de condensation est évacuée. Dans le sous-refroidisseur, le fluide frigorigène est refroidi, ce qui optimise l'efficacité énergétique du processus.

Lorsque, par exemple, une partie de la chaleur doit être utilisée du côté haute pression, le planificateur doit exiger l'intégration d'un désurchauffeur. Le fournisseur de la machine frigorifique précise la puissance dans ses données techniques.

Conditions préalables à l'utilisation d'un désurchauffeur:

- Demande de chaleur suffisante disponible

- Le niveau de température requis peut être atteint par le désurchauffeur même à charge partielle
- Puissance suffisante du désurchauffeur, notamment à charge partielle. Lorsque cette valeur est trop faible (inférieure à 10%  $\dot{Q}_C$ ), la rentabilité n'est pas garantie.

**Remarque:** Si les pertes de charge sont négligées, la pression du côté du fluide frigorigène est la même dans tous les appareils. Cela correspond à la température de condensation.

Illustration 5.25: Exemple d'utilisations possibles de la chaleur du côté du condenseur à différents niveaux de température.

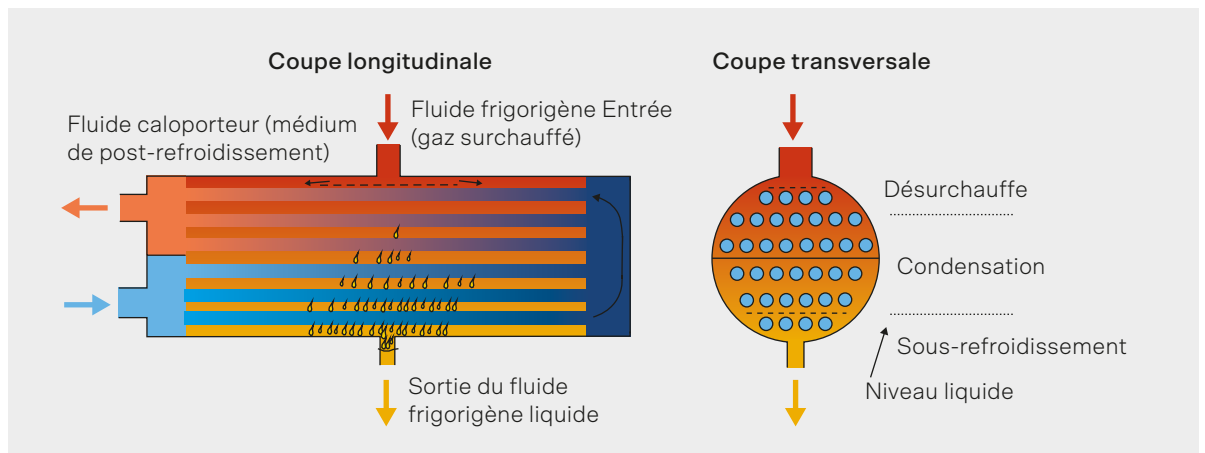
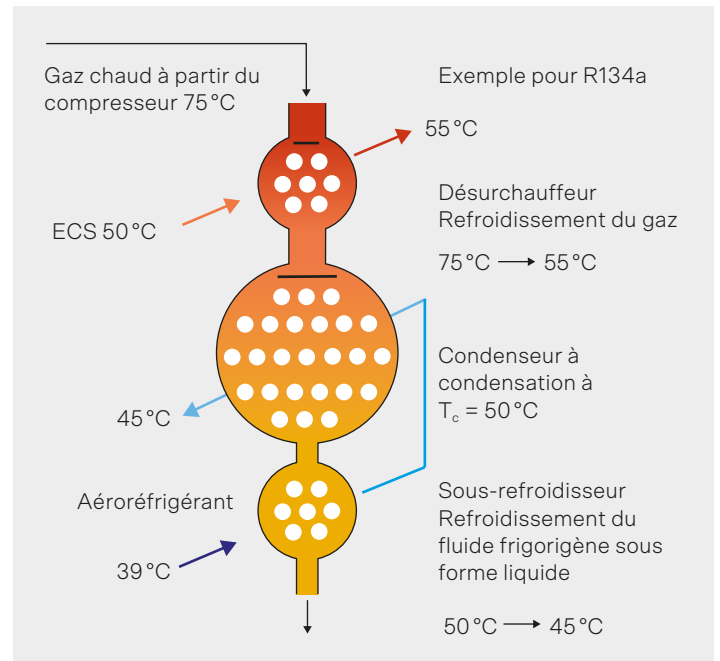


Illustration 5.24: Condenseur à faisceau multitubulaire en exécution 2-passes sur le côté fluide caloporteur.

L'installation d'un sous-refroidisseur relève de l'appréciation du constructeur de la machine frigorifique. Le sous-refroidissement est crucial en termes de puissance et d'efficacité.

Il est impératif que le planificateur et l'installateur s'assurent que les raccords de tuyauterie sont effectués conformément aux spécifications du fournisseur de la machine frigorifique. Lorsque les connexions sont inversées, la puissance et l'efficacité de la machine frigorifique s'en trouveront réduites. L'illustration 5.26 montre une autre possibilité d'utilisation de la chaleur.

Avec cette solution, le fluide frigorigène et sa quantité de remplissage doivent être pris en compte. Dans ce cas, les fluides frigorigènes stables dans l'air ne respectent généralement pas les quantités maximales admissibles exigées par l'ORRChim en raison de la grande quantité requise pour le remplissage en fluide frigorigène. Avec un fluide frigorigène stable dans l'air, il convient donc de vérifier si un échangeur de chaleur à plaques peut être utilisé (voir Illustr. 3.16 et 4.4).

#### Remarque relative aux fluides frigorigènes de classe B (toxicité plus élevée)

L'exploitation directe de la chaleur de désurchauffe et de condensation (entre le fluide frigorigène et l'eau chaude sanitaire) n'est pas autorisée avec les fluides frigorigènes «toxiques» tels que l'ammoniac. Un circuit intermédiaire doit être prévu à cet effet. Une autre solution consiste à utiliser des échangeurs de chaleur à double paroi. Les réglementations cantonales sont ici déterminantes.

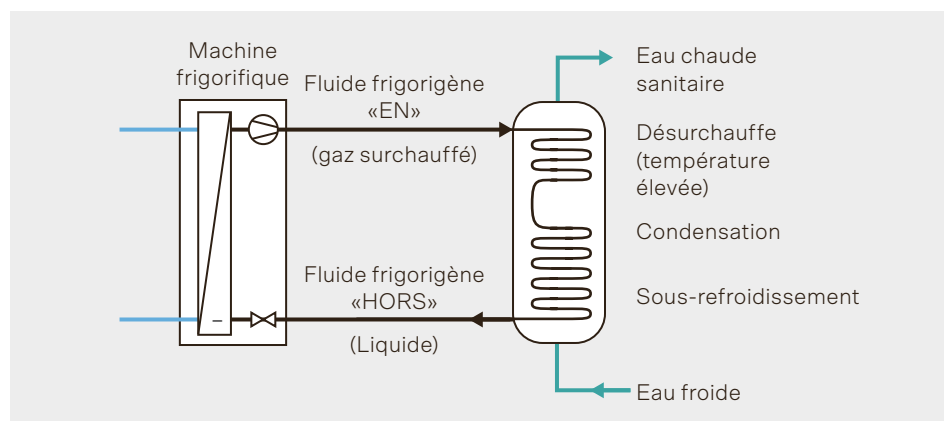


Illustration 5.26:  
Utilisation de la chaleur pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire.

### Condenseur direct avec échangeur de chaleur à lamelles

L'utilisation d'un condenseur direct dans un système split\* présente des avantages en termes de coûts d'investissement et d'efficacité énergétique. L'inconvénient est le remplissage plus important en fluide frigorigène.

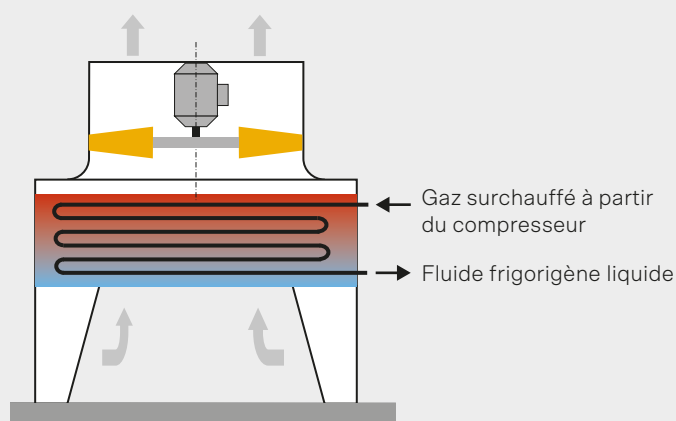
Selon l'ORRChim, la teneur en fluide frigorigène d'une installation doit être aussi faible que possible. Les quantités maximales de fluide frigorigène sont définies dans la directive.

Dans le cas d'une machine frigorifique compacte (également appelée groupe frigorifique) installée sur le toit du bâtiment, l'inconvénient d'un remplissage important en fluide frigorigène peut être limité car le condenseur est intégré directement dans la machine frigorifique. Les longues conduites de raccordement ne sont donc plus nécessaires.

\*La machine frigorifique avec compresseur et évaporateur est située dans la salle de la machine frigorifique, le condenseur est situé sur le toit, comme le montre l'illustration 5.27.



Illustration 5.27: Principe du condenseur direct comme exemple d'installation.



## 5.8 Détendeur

Le détendeur (organe d'étranglement) détend le fluide frigorigène du côté haute pression vers le côté basse pression du circuit et régule le débit de celui-ci vers l'évaporateur. La quantité de fluide frigorigène «injectée» doit être régulée pour qu'il n'y ait pas de fluide frigorigène à la sortie de l'évaporateur. Cela protège le compresseur contre les coups de liquide.

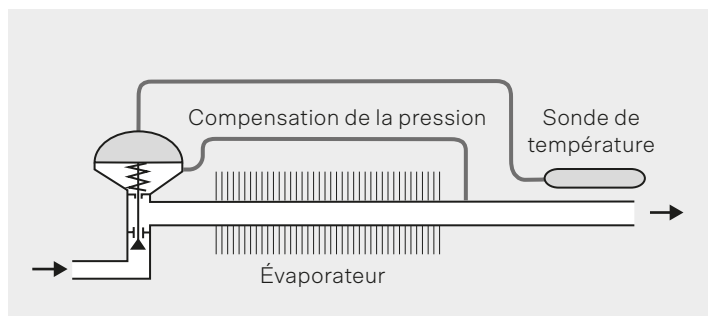
Un détendeur correctement dimensionné a un impact significatif sur l'efficacité et la puissance d'une machine frigorifique.

### Détendeur thermostatique

Le détendeur thermostatique est une solution peu coûteuse pour la détente du fluide frigorigène. Les variables contrôlées sont la température du gaz d'aspiration et la pression d'évaporation. Cependant, le réglage correct d'une vanne thermostatique prend beaucoup de temps. Le frigoriste règle généralement la vanne de manière à ce que la surchauffe soit de 6 à 7 K. Il s'assure ainsi qu'après l'évaporateur, tout le fluide frigorigène est évaporé (gazeux) et que le compresseur n'aspire pas de frigorigène en phase liquide.

Pour éviter les coups de liquide au démarrage du compresseur, il faut également installer une électrovanne avec une fonction d'ouverture-fermeture en amont du détendeur thermostatique.

Illustration 5.28:  
Détendeur thermostatique.



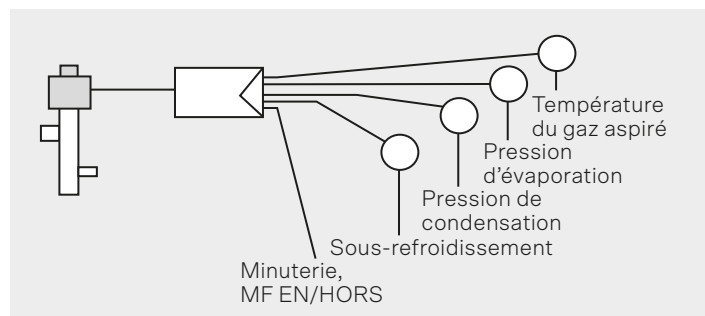
### Détendeur électronique (DE)

Le détendeur électronique se compose d'une vanne motorisée et d'un régulateur associé. Plusieurs paramètres sont utilisés pour réguler le détendeur électronique. Outre la température des gaz d'aspiration (ou leur pression), on utilise la pression de condensation, le sous-refroidissement et, dans le cas des évaporateurs noyés, le niveau de liquide dans le condenseur et d'autres variables. L'algorithme est généralement librement programmable et permet donc des solutions spécifiques.

L'avantage du détendeur électronique est le réglage simple et exact de la surchauffe sur le régulateur pour différentes conditions. En règle générale, la surchauffe est réglée à 4 ou 5 K pour les installations à détente sèche. Elle est inférieure de 2 à 3 K à celle d'un détendeur thermostatique. Cela peut améliorer d'environ 5% l'efficacité énergétique de l'installation. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, l'utilisation du détendeur électronique est préférable à celle de la vanne thermostatique.

Le dimensionnement et le réglage du détendeur sont de la responsabilité du constructeur de la machine frigorifique.

Illustration 5.29:  
Diverses variables mesurées peuvent être utilisées pour la commande du détendeur électronique.



## 5.9 Autres composants

### Filtre déshydrateur

Dans les installations utilisant des fluides frigorigènes synthétiques, l'eau peut pénétrer dans le circuit frigorifique dans certains cas: du fait d'un séchage insuffisant de la nouvelle installation, avec le fluide frigorigène ou avec l'huile. La présence d'eau dans le fluide frigorigène peut provoquer le givrage du détendeur et des changements dans la qualité du fluide. Dans le cas des compresseurs hermétiques et semi-hermétiques, l'humidité peut endommager indirectement l'entraînement du moteur électrique. Il est donc important que le fluide frigorigène soit toujours «sec», ce qui est assuré par les filtres dessiccateurs installés dans le circuit du fluide frigorigène. Le remplacement des éléments installés est de la responsabilité de l'entrepreneur de service.

Dans le cas des installations hermétiques, le filtre dessiccateur n'est souvent pas présent pour des raisons économiques.

### Voyant avec indicateur d'humidité

Dans les systèmes utilisant des fluides frigorigènes synthétiques, le voyant permet de contrôler visuellement l'humidité du système et la formation de flashgaz (bulles de gaz) et d'indiquer un manque de fluide frigorigène, un filtre dessiccateur souillé etc.

Le voyant permet au frigoriste de déterminer le remplissage correct en fluide frigorigène.

### Dispositifs de décharge de pression

Les installations frigorifiques doivent être protégées contre les surpressions

par des dispositifs de limitation de pression (soupapes de sécurité) (voir norme SN EN 378-2).

Les compresseurs sont normalement protégés contre une surpression par des soupapes de décharge sur le côté aspiration.

Les récipients sous pression des machines frigorifiques doivent être protégés contre une pression excessive par des dispositifs de délimitation de pression. L'évacuation du fluide frigorigène dans l'atmosphère via la soupape de sécurité est considérée comme la dernière mesure de sécurité pour protéger le récipient. Le fluide frigorigène n'est relargué que lorsque toutes les autres mesures de sécurité en amont (telles que l'arrêt de la haute pression) n'ont pas pu empêcher l'excès de pression. L'illustration 5.30 présente des exemples de dispositifs de décharge de pression.

Les soupapes de sécurité doivent être contrôlées à intervalles réguliers conformément aux prescriptions de l'ASIT.

Cela signifie que dans le cas d'une simple soupape de sécurité, lors du contrôle des récipients, il faut extraire le fluide frigorigène de la partie concernée de l'installation, installer une soupape de remplacement et envoyer la soupape d'origine à la révision. Ce travail est très onéreux. Il faut donc s'enquérir des coûts induits auprès du fournisseur, car ils sont très individualisés.

Afin de réduire ces coûts, il est intéressant d'équiper la machine frigorifique de doubles soupapes pour les installations d'une puissance frigorifique d'environ 300 kW ou plus et avec un contenu frigorifique plus important.

La vanne d'inversion en amont garantit qu'une seule soupape de sécurité est active. La vanne inactive peut alors être démontée et révisée.

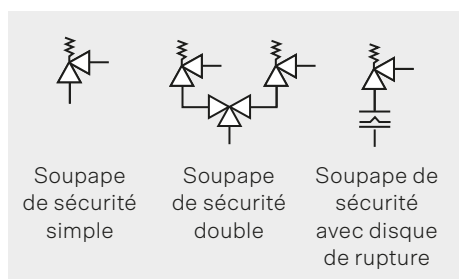


Illustration 5.30:  
Types de dispositifs  
de décharge de  
pression.

Avec les dispositifs de limitation de pression, il existe toujours un risque de perte graduelle du fluide frigorigène due aux fuites. Pour éviter cela, il est possible d'installer des disques de rupture (voir Illustr. 5.30).

Pour des raisons de coût, cette option n'est toutefois utilisée que dans les installations avec un remplissage important en fluide frigorigène.

Lors de la décharge de la soupape, le fluide frigorigène gazeux mis à l'air ne doit pas mettre en danger les personnes ou les biens (voir SN EN 378). Si le contenu de la machine est faible, le fluide frigorigène ne peut être évacué dans la salle des machines que si sa concentration ne dépasse pas la valeur limite pratique. Il y a dans ce cas lieu de respecter la norme SN EN 378.

Sinon, il est obligatoire d'installer la conduite dite d'échappement de la soupape de sécurité vers l'extérieur.

Celle-ci doit être calculée conformément à la norme EN 13136. Pour ce calcul, le planificateur doit être assisté du constructeur de machine. Le type de fluide frigorigène, la contre-pression admissible, la perte de charge de la conduite de décharge et la taille de la vanne jouent un rôle déterminant.

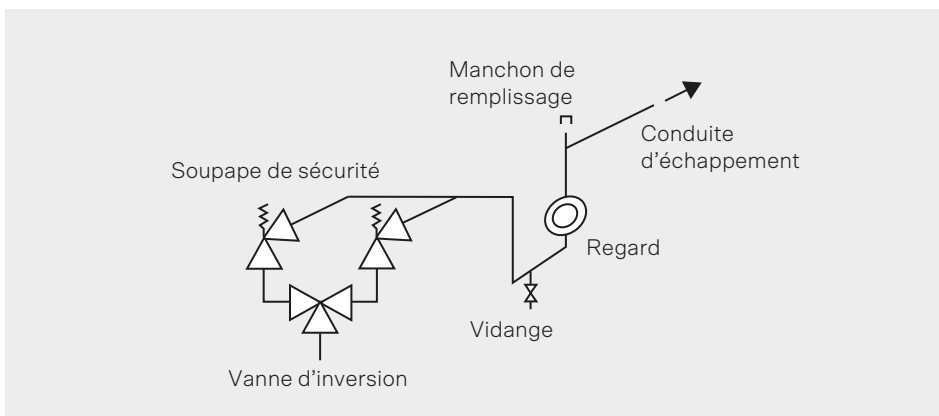
Lors de l'installation, il faut veiller à ce qu'il soit toujours possible de vérifier aisément l'étanchéité du dispositif. L'illustration 5.32 montre une variante possible de l'installation de la conduite d'échappement avec piège en U rempli de glycérine utilisant des fluides frigorigènes synthétiques.

**Remarque:** Cette solution n'est pas autorisée pour les installations à CO<sub>2</sub> (dangereux).

Illustration 5.31:  
Une variante possible avec un réservoir de glycérine et un regard, qui peut être utilisé pour vérifier les fuites.



Illustration 5.32:  
Installation de la conduite d'échappement après la soupape de sécurité.



## 5.10 Conception du système en fonction du type d'évaporateur

La conception d'une machine frigorifique a une influence considérable sur l'efficacité énergétique et le prix de l'installation. Le type d'évaporateur est déterminant: évaporateur à détente sèche ou évaporateur noyé. Les exemples suivants sont basés sur l'échangeur de chaleur multitubulaire.

### Système avec détente sèche

Avec la détente sèche, le fluide frigorigène passe dans les tubes de l'évaporateur. Avec les compresseurs lubrifiés à l'huile, il faut veiller à ce que celle-ci circule dans le circuit. Pour cela, le débit volumique du fluide frigorigène (correspondant à la puissance frigorifique) ne doit généralement pas être réduit en dessous d'environ 50%. Pour les machines frigorifiques où une plus grande plage de contrôle est nécessaire, deux circuits séparés doivent être utilisés. Lorsqu'une puissance frigorifique inférieure à 50% est nécessaire, un circuit peut alors être débranché.

Dans ce cas, la surface active des échangeurs de chaleur – tant ceux de l'évaporateur que ceux du condenseur – est ré-

duite. Cela a un effet négatif sur l'efficacité énergétique de l'installation.

L'illustration 5.33 montre une machine frigorifique avec deux circuits séparés. L'évaporateur est séparé horizontalement du côté du fluide frigorigène, tandis que le condenseur est divisé verticalement. Il est également possible d'utiliser deux échangeurs de chaleur séparés.

### Principaux avantages et inconvénients d'une machine frigorifique à circuits séparés:

- Principaux avantages et inconvénients d'une machine frigorifique à circuits séparés:
- Une plus grande sécurité d'approvisionnement: si un circuit tombe en panne, le second reste disponible (mais il faut noter que cela ne s'applique pas en cas de défaillance du système de commande et de régulation)
- Une solution plus économique que la variante de l'évaporateur noyé
- Une efficacité énergétique moindre à pleine charge et surtout à charge partielle

Pour plus de détails, voir également la comparaison des types d'évaporateurs.

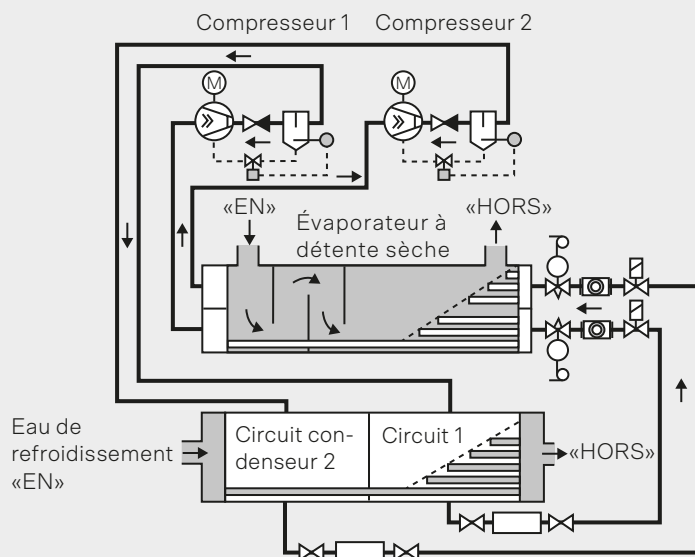


Illustration 5.33:  
Système à détente sèche avec deux circuits séparés.

### Système avec évaporateur noyé

Avec un évaporateur noyé, le fluide frigorigène se trouve dans la calandre de l'échangeur de chaleur. Dans le cas des compresseurs lubrifiés à l'huile, il faut s'assurer sur toute la plage de régulation que l'huile circule dans le système, car la recirculation de l'huile depuis l'évaporateur est nécessaire. L'évaporateur fonctionne comme un appareil de distillation, c'est-à-dire que la vapeur du fluide frigorigène est extraite par le haut et l'huile reste dans l'appareil.

À charge réduite, la totalité de la surface de l'échangeur de chaleur reste active. Cela entraîne une augmentation de la température d'évaporation et une diminution de la température de condensa-

tion. Le compresseur doit alors surmonter une différence de pression plus faible, et le coefficient de performance de la machine frigorifique augmente en conséquence.

**Remarque:** Contrairement aux fluides frigorigènes synthétiques, l'ammoniac liquide ne se mélange pas avec les huiles de machine habituelles. L'huile est plus lourde que le  $NH_3$  et s'accumule dans le «carter» du séparateur. Elle est renvoyée au compresseur par une pompe.

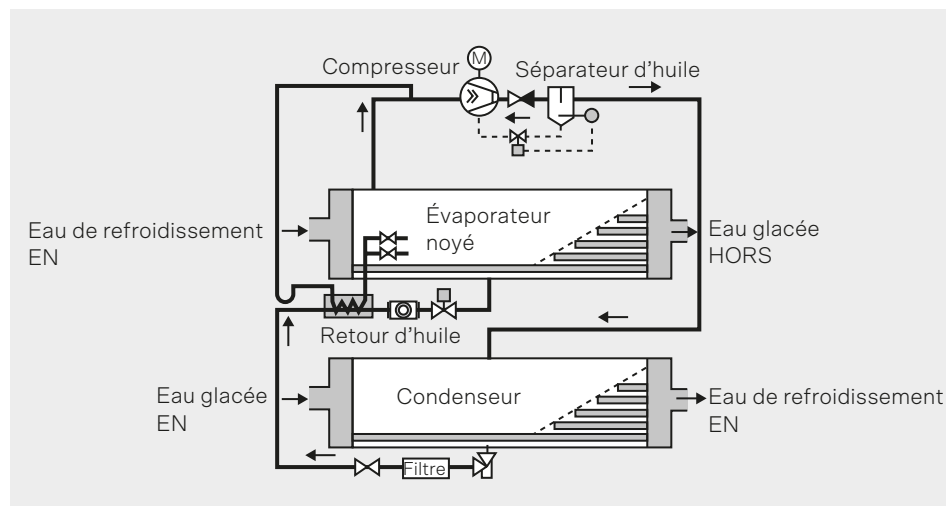


Illustration 5.34: Système d'évaporateur à faisceau multi-tubulaire noyé avec fluides frigorigènes synthétiques.

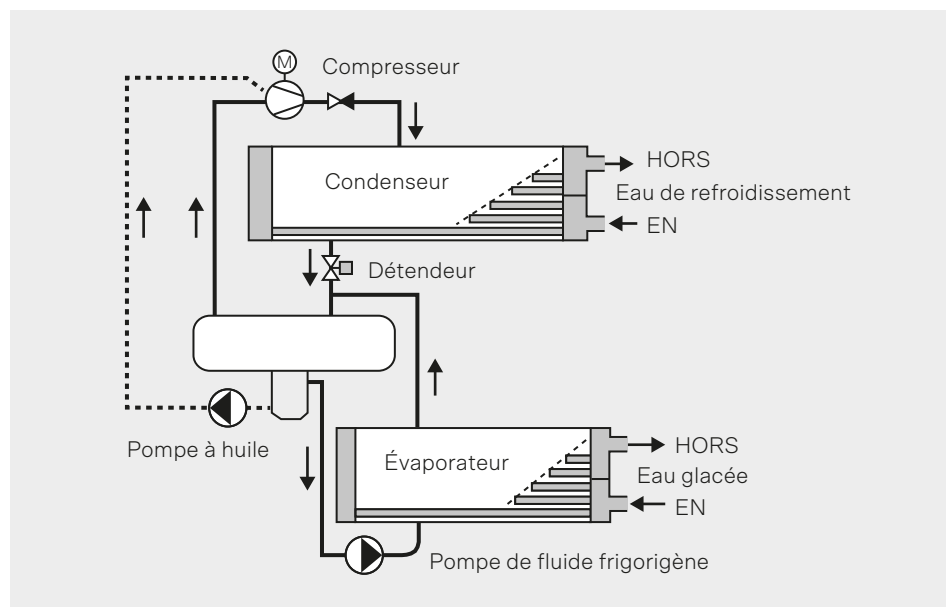


Illustration 5.35: Système d'évaporateur à faisceau multi-tubulaire noyé avec ammoniac comme fluide frigorigène.



### 10 points relatifs à la production de froid

1. Les principaux composants du circuit de froid sont le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur.
2. Lors du choix d'une machine frigorifique, le coût global est le facteur décisif.
3. La plage de régulation de la machine frigorifique doit être adaptée aux conditions de fonctionnement de l'installation.
4. La puissance et le rendement du compresseur dépendent de la température et de la charge requise.
5. Les compresseurs à vitesse de rotation régulée se caractérisent par une efficacité énergétique optimale (comportement en charge partielle) et une usure réduite (coûts d'entretien moindres).
6. La machine frigorifique doit être protégée contre les pressions excessives.
7. Différents types de compresseurs sont utilisés en fonction de l'application et des coûts induits. Une distinction est faite entre les compresseurs entièrement hermétiques, semi-hermétiques et ouverts.
8. Un détendeur électronique offre une meilleure efficacité énergétique qu'un détendeur thermostatique, car les températures peuvent être réglées plus précisément.
9. Si admissible, il faut utiliser pour les pompes des modèles à vitesse régulée et donc efficaces.
10. Pour les garanties, l'installation doit être contrôlée en fonctionnement à pleine charge et à charge partielle.

## Digression

### Machines frigorifiques à absorption

La compression mécanique des vapeurs de frigorigène est remplacée par une «compression thermique» dans une machine frigorifique à absorption. L'utilisation d'un «absorbeur» n'étant pas très courante par rapport au refroidissement mécanique, seuls le principe et les conditions préalables importantes pour une utilisation judicieuse sont expliqués ici.

Le fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption (MFA) est similaire à celui d'une machine frigorifique à compression dans la mesure où il comporte également un évaporateur, un condenseur et un organe de détente. Cependant, dans la machine frigorifique à absorption, un circuit de sorption avec une pompe remplace le compresseur mécanique.

L'absorbeur correspond au «côté aspiration» du compresseur. Dans cet appareil, la solution, riche en absorbants, absorbe la vapeur du fluide frigorigène extraite de l'évaporateur. Cela dégage de la chaleur devant être évacuée. La pompe surmonte la différence de pression et transporte la solution de l'absorbeur au bouilleur.

Dans le bouilleur, la solution, pauvre en absorbants, est chauffée par un apport de chaleur externe, de sorte que la vapeur du fluide frigorigène est expulsée et ensuite condensée dans le condenseur. Le bouilleur correspond donc au côté haute pression du compresseur. La solution est riche en absorbants et retourne à l'absorbeur via une vanne de régulation de la solution. La quantité de chaleur fournie au bouilleur correspond au travail de compression mécanique. La puissance nécessaire à la pompe de surpression est relativement faible.

#### Paires de substances usuelles

- Ammoniac (fluide frigorigène) et eau (absorbant)
- Eau (fluide frigorigène) et solution de bromure de lithium (absorbant)

**Une machine à absorption utilise la chaleur pour produire du froid.**

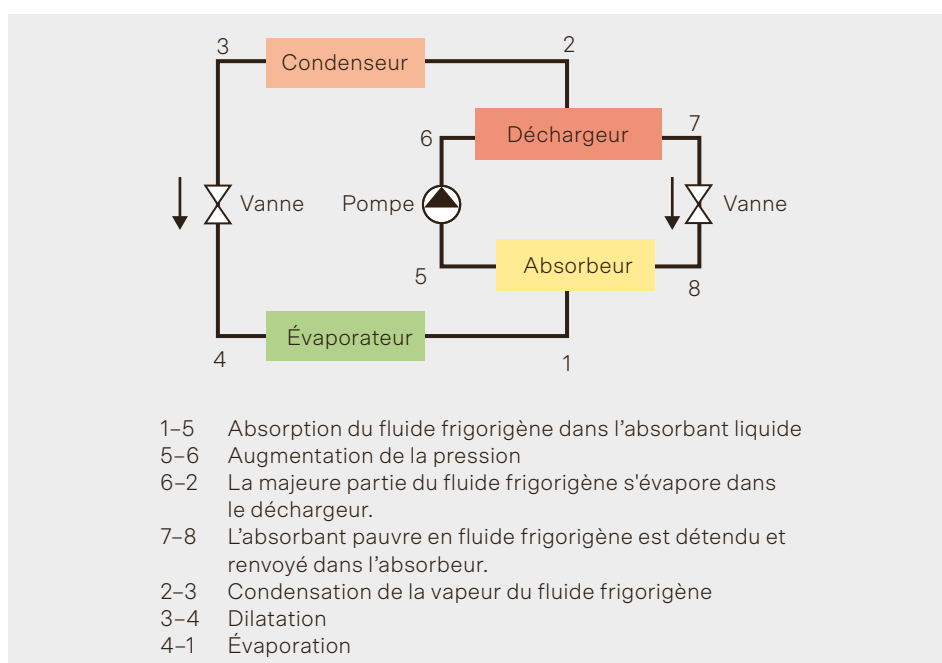


Illustration 5.36:  
Principe d'une machine frigorifique à absorption.

### Comparaison énergétique du refroidissement par absorption et par compression

L'efficacité énergétique d'une machine frigorifique à absorption est évaluée par le «coefficient de chaleur»:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{Froid}}}{Q_{\text{Bouilleur}}}$$

- Les coefficients de chaleur pour un procédé à une seule étape ou des températures de chauffage comprises entre 80 et 100 °C sont de l'ordre de 0,65 à 0,75.
- Les coefficients de chaleur pour un procédé en deux étapes ou des températures de chauffage comprises entre 150 et 180 °C sont de l'ordre de 1,10 à 1,20.

### Conditions préalables à l'utilisation judicieuse des absorbeurs

- Une charge aussi constante que possible (couverture de la charge de base)
- Niveau de température le plus élevé possible pour le bouilleur (à partir de 90 °C)
- La combinaison avec des capteurs solaires à haute performance est très judicieuse, mais nécessite des coûts d'investissement élevés.
- L'énergie thermique à un prix favorable, notamment l'utilisation de la chaleur des UIOM en été, de la chaleur des CCF et d'autres sources. Le chauffage direct à mazout ou à gaz n'est généralement pas économique.

En règle générale, le kWh d'énergie thermique doit être environ 6 fois moins cher que le kWh d'électricité.

### Avantages

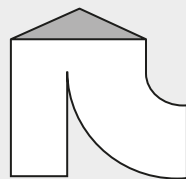
- Presque aucune usure mécanique
- Longue durée de vie
- Coûts de maintenance minimales
- Aucun problème de lubrification
- Presque aucun bruit, très silencieux
- Utilisation de la chaleur résiduelle supérieure à 90 °C
- Régulation simple

### Inconvénients

- Coûts d'investissement élevés
- Grande consommation d'eau de refroidissement (grand aéroréfrigérant, encombrement!)
- Mélange de travail H<sub>2</sub>O/LiBr très corrosif, fonctionnement sous vide
- L'ammoniac est très toxique, parfois explosif
- Risque de cristallisation
- Lourd (poids élevé)

#### Machine frigorifique à absorption

240% chaleur de l'eau de refroidissement

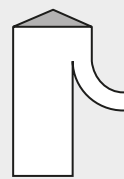


140% énergie thermique

100% froid utile

#### Machine frigorifique à compression

125% chaleur de l'eau de refroidissement



25% énergie électrique

100% froid utile

Illustration 5.37: Comparaison énergétique du froid par compression et du froid par absorption.

# Absorption de chaleur

L'absorption de chaleur est efficace lorsque le refroidissement est effectué à un niveau de température proche de la température ambiante ou de celle pour l'utilisation souhaitée. Le planificateur dispose de plusieurs options pour les différentes fonctions du bâtiment, le point de départ étant toujours la température requise.

## 6.1 Considérations conceptuelles

Pour la conception de l'absorption de chaleur, il faut connaître différentes exigences de planification. Un catalogue de questions permet de compiler les informations les plus importantes.

- À quoi sert le refroidissement: refroidissement de locaux, déshumidification, déshumidification partielle, refroidissement de processus etc.?
- Quelles sont les exigences architecturales et techniques?
- Quelles sont les températures (eau glacée) requises?
- Quelles sont les températures optimales de départ et de retour aux consommateurs?
- Quelles parties d'installation de la production frigorifique totale ont des températures différentes?
- Existe-t-il des sources de refroidissement naturelles exploitables?

Température de l'eau glacée =  
Température de départ du circuit  
frigorifique

### Point de départ: Température utile

La température utile requise pour certaines fonctions ou applications détermine celle de l'eau glacée. La température finale utile peut être, par exemple une température ambiante de 26 °C, une température d'air soufflé de 20 °C ou un point de rosée pour la déshumidification.

### Température de l'eau glacée

La température utile finale montre clairement qu'il ne doit pas y avoir une seule température d'eau glacée aussi basse que possible pour toutes les fonctions, comme c'était souvent le cas dans le passé. Il est plutôt nécessaire de définir des températures d'eau glacée spécifiques à l'utilisateur, adaptées à l'application concernée. En règle générale, les températures élevées de l'eau glacée permettent une grande efficacité de la production de froid.

### Sources de refroidissement

Le froid provient d'une machine frigorifique ou de sources naturelles telles que les sondes géothermiques, l'air, le lac ou les eaux souterraines. Lorsque le système de refroidissement fonctionne avec des températures d'eau glacée élevées (températures du frigoporteur), les sources de refroidissement naturelles peuvent contribuer davantage au refroidissement ou le couvrir complètement (couverture totale).

Dans la première phase du concept, tous les «besoins de refroidissement» sont définis avec les exigences de performance correspondantes. À savoir:

- Refroidissement dans les systèmes de ventilation (refroidisseurs d'air)
- Refroidissement technique des appareils
- Refroidissement pour les marchandises spéciales etc.
- Refroidissement de la pièce pour le confort

Un autre point serait les applications de refroidissement de processus et industriel, qui ne sont pas traitées dans cet ouvrage spécialisé.

### Les températures ambiantes maximales sont déterminantes

La condition décisive pour le refroidissement est la température ambiante re-

quise avec une valeur maximale correspondante garantie, c'est-à-dire qui ne doit pas être dépassée. Cette température est généralement spécifiée par des installations techniques (local des installations électriques, salles de serveurs, laboratoires etc.) ou par des biens spéciaux (biens culturels dans les musées). Les exigences de l'utilisateur en matière de température ambiante qui offrent plus de confort sont définies comme un refroidissement de confort selon les lois sur l'énergie et le travail. Lors de la planification, il convient de clarifier si le refroidissement concerne les personnes ou s'il est uniquement de nature technique. Dès que le refroidissement affecte les personnes pendant une période plus longue (c.-à-d. si elles séjournent dans la pièce pendant 6 à 8 heures), les exigences de confort (voir Illustr. 6.2) doivent être satisfaites.

Les systèmes suivants ne sont pas considérés comme du refroidissement au sens de la loi sur l'énergie – bien qu'ils soient également utilisés pour celui-ci:

- Utilisation du côté froid lors d'un fonctionnement avec pompe à chaleur à des fins de chauffage, lorsque 100 % de la chaleur est utilisée.

- Refroidissement de l'environnement avec des sources de refroidissement naturelles (air extérieur, sol, eaux souterraines, eaux de surface etc.)

### Définir les températures de l'eau glacée

En fonction des différents besoins de refroidissement, le planificateur définit d'abord la température de l'eau glacée primaire. Lorsqu'une température d'eau glacée pour l'ensemble du système n'est pas raisonnable ou n'est pas admissible d'un point de vue énergétique, des températures d'eau glacée individuelles sont indiquées. Lorsque les températures de l'eau glacée diffèrent de plus de 4 K, deux machines frigorifiques avec des niveaux de température différents sont nécessaires. Ou alors deux accumulateurs frigorifiques avec des températures de charge correspondantes seront prévus. Dans ce contexte, une température supérieure de 4 K correspond à une amélioration de l'efficacité d'environ 11%.

Les différences de température doivent être prises en compte pour les puissances frigorifiques globales supérieures à 100 kW. En plus de la différence de température de 4 K, la part d'un consom-

Illustration 6.1:  
Exemple de groupes de consommateurs ayant des températures d'eau glacée différentes.

	Température d'eau glacée	Part à la puissance	Puissance $\dot{Q}_{\text{Froid}}$	
<b>Cas A</b>				
Groupe A	13 °C	10 %	10 kW	
Groupe B	10 °C	90 %	90 kW	
Total			100 kW	
Solution	1 machine frigorifique 100 kW à 10 °C. La différence de température n'est pas supérieure à 4 K. En outre, les consommateurs de froid «plus chauds» ont une part subordonnée de 10 % de la production totale.			
<b>Cas B</b>				
Groupe A	14 °C	80 %	80 kW	
Groupe B	8 °C	20 %	20 kW	
Total			100 kW	
Solution	2 machines frigorifiques 20 kW et 80 kW. La différence de température est supérieure à 4 K (6 K), une seconde machine frigorifique est nécessaire. En outre, les consommateurs «plus froids» représentent une part importante de 20 % de la puissance totale.			

mateur de froid avec une température d'eau glacée différente de la puissance globale est également déterminante (Illustr. 6.1). Lorsque la part de la puissance globale est faible, il est possible de se passer d'un second système de générateur avec une autre température.

### Régulation des groupes de froid

Les groupes de froid doivent être équipés de régulateurs de température de départ de manière à ce que les températures de retour soient toujours élevées et appropriées. En outre, les consommateurs doivent être équipés de régulateurs de débit (vannes de passage) pour un réseau d'eau glacée efficient.

**À noter:** Les vannes de dérivation sont une mauvaise solution car elles créent des «basses températures de retour» dans le réseau d'eau glacée, détériorent l'efficacité de la production de froid et entraînent également une réduction de la puissance frigorifique.

## 6.2 Systèmes d'absorption de chaleur

### Températures de l'eau glacée

Les systèmes d'absorption de chaleur évacuent les charges de la pièce (chaleur). Les températures ambiantes possibles et réalisables peuvent être déduites des charges libérées dans la pièce. Les systèmes d'absorption de chaleur sont définis dans la norme SIA 382/1 (2014) (systèmes de ventilation et de climatisation) par des températures d'eau

glacée. Les températures de l'eau glacée sont structurées comme suit:

### Refroidissement avec déshumidification contrôlée

Dans le passé, toutes les machines frigorifiques étaient dimensionnées avec 6 °C/12 °C (6 °C pour le départ du fluide frigoporteur et 12 °C pour le retour de celui-ci) pour la température d'eau glacée techniquement la plus basse. Par conséquent, il existe encore d'anciennes installations frigorifiques avec ces températures d'eau glacée pour les immeubles administratifs et les besoins de confort.

**Il convient de noter:** Il convient de noter: À des températures d'eau glacée de 10 °C, le refroidisseur d'air – en fonction du taux d'humidité de l'air – doit offrir une puissance de séparation de l'eau jusqu'à 30 % supérieure.

Selon la loi sur l'énergie, une température d'eau glacée de 6 °C ou plus ne peut être utilisée que pour des processus de déshumidification absolument nécessaires et nécessite une autorisation correspondante. Cela est nécessaire, par exemple, dans les musées, dans l'industrie (papier, produits pharmaceutiques etc.) ou, de manière générale, pour les locaux à faible température ambiante (p.ex. les chambres froides de 15 à 18 °C dans l'industrie alimentaire, dans les laboratoires et chambres climatiques etc.). Il convient de noter que la déshumidification de l'air peut être réalisée non seulement avec de faibles températures d'eau glacée, mais aussi en appliquant des procédés d'absorption<sup>1</sup>. En outre, le chauffage peut réduire l'humidité relative, car l'air chaud peut absorber davantage d'humidité et la reprendre à l'air à déshumidifier.<sup>2</sup>

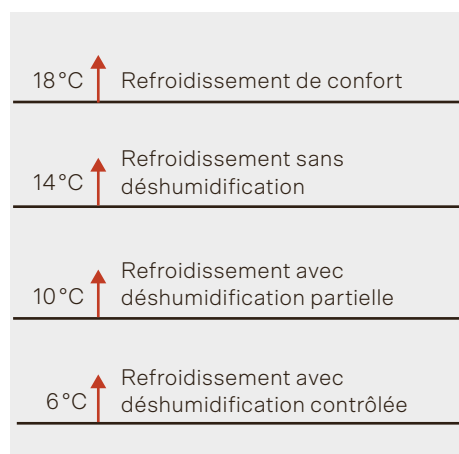


Illustration 6.2:  
Pour les utilisations de refroidissement listées, les températures de l'eau froide ne doivent pas descendre en dessous de celles spécifiées par la SIA.

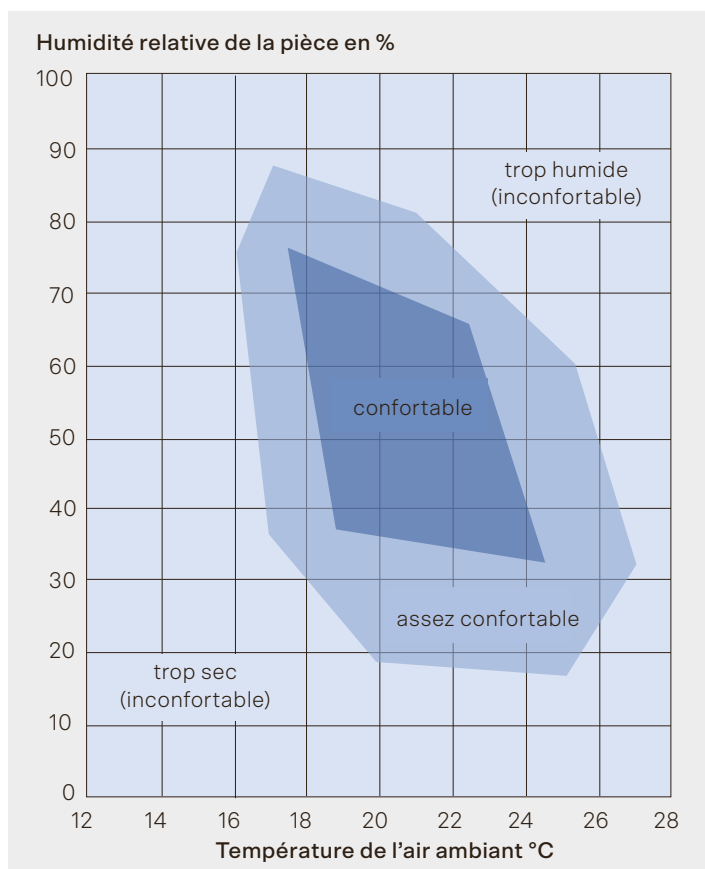
<sup>1</sup> L'absorption se fait avec deux débits volumiques d'air. L'humidité est retirée du débit d'air soufflé à l'aide d'une «roue à humidité» et transférée à l'air évacué (air de régénération).

<sup>2</sup> Le refroidissement par séchage et évaporation est également appelé DCS (Desiccant Cooling Systems) ou DEC (Desiccative and Evaporative Cooling, système à dessiccation/évaporation) en langage technique.

### Refroidissement avec déshumidification partielle

Les installations de ventilation refroidies avec de l'eau glacée à partir de 10 °C sont appelées déshumidification partielle non garantie. L'air est refroidi avec l'eau glacée jusqu'à la température de l'air soufflé de 18 °C, par exemple. Au cours de ce processus, la température du refroidisseur tombe temporairement en dessous du point de rosée, ce qui entraîne une condensation. Cette déshumidification partielle est avantageuse pour les systèmes de refroidissement des locaux qui ne doivent pas être arrêtés par la condensation (p.ex. plafonds rafraîchissants, refroidissements de surface). La nécessité d'utiliser une température d'eau glacée de 10 °C pour le refroidissement des locaux doit être prouvée dans la procédure d'autorisation (loi sur l'énergie selon la SIA 382/1 (2014) en tant qu'exigence). Il est nécessaire, par exemple, pour les processus ou les plafonds rafraîchissants pour le refroidissement des pièces qui nécessitent des températures ambiantes

Illustration 6.3:  
Le confort (température de bien-être) dépend de la température et de l'humidité de l'air ambiant.



de 20 °C ou moins. Des températures ambiantes aussi basses ne peuvent jamais être justifiées par de simples conditions de confort, mais uniquement par des exigences techniques accrues.

### Refroidissement sans déshumidification

Une température d'eau glacée de 14 °C est énergétiquement optimale pour les installations de ventilation, car presque aucune puissance latente supplémentaire n'est nécessaire en raison de la condensation de l'eau au niveau du refroidisseur d'air. L'inconvénient d'une température d'eau glacée de 14 °C est que, dans les installations de ventilation, l'air soufflé a une humidité plus élevée. Une humidité élevée de plus de 65 % n'est pas perçue comme confortable dans les pièces, car la température générale de l'air ambiant est perçue comme «moite» et trop chaude.

### Refroidissement de confort

Tous les systèmes de refroidissement de surface (plafonds rafraîchissants, chauffage par le sol TABS, etc.) fonctionnent avec des températures d'eau glacée de 18 à 22 °C. Cette température de départ permet un système de refroidissement de surface avec une ventilation contrôlée. Sans ventilation mécanique, de la condensation peut se produire sur les surfaces à forte humidité (sans protection contre la condensation). Une température d'eau glacée de 18 °C, ne permet d'atteindre des températures ambiantes d'environ 24 °C que de façon limitée – il est possible d'atteindre des températures ambiantes d'environ 26 °C avec cette solution. Les refroidisseurs à air recyclé (voir ci-dessous) peuvent également fonctionner à 18 °C, mais dans ce cas, la condensation peut encore se produire si la charge d'humidité est élevée (p.ex. température de l'air ambiant de 25 °C et humidité relative de 50%) dans la pièce. Dans ce cas, la température de départ de l'eau glacée doit être augmentée, ce qui entraîne également une hausse de la température ambiante.

### Convecteurs de climatisation

Dans les bâtiments existants, on peut encore voir ci et là des convecteurs de climatisation. Ils ont été utilisés dans de nombreux immeubles de bureaux dans les années 1980. On peut donc les trouver dans les rénovations, mais ils ne sont pratiquement jamais utilisés dans les nouveaux bâtiments.

Les convecteurs de climatisation sont installés dans l'allège sous la fenêtre. Les convecteurs de climatisation peuvent ventiler, chauffer et refroidir et sont très efficaces. Les thématiques suivantes doivent être prises en compte: la protection contre le bruit, les courants d'air et la protection incendie. Les convecteurs de climatisation sont disponibles en deux modèles:

- avec ventilateur intégré (ventilo-convecteur)

Illustration 6.4:  
Convecteur de climatisation, discrètement encastré dans le sol. (Source: Allco Allenspach AG)



Illustration 6.5:  
Détails d'un convecteur de climatisation encastré dans le sol avec prise d'air primaire. (Source: Allco Allenspach AG)



Illustration 6.6:  
Les convecteurs de climatisation sans ventilateur (appareils à induction) fonctionnent silencieusement. (Source: Swegon)



- avec l'air soufflé directement acheminé par des buses, qui attirent l'air secondaire et le soufflent dans la pièce à travers l'échangeur de chaleur.

Les modèles dotés de ventilateurs intégrés posent souvent des problèmes de bruit. L'avantage est que l'air soufflé dans la pièce est découplé du convecteur de climatisation. Il n'est pas nécessaire d'installer une conduite de ventilation sur le convecteur.

Les modèles où l'air soufflé est conduit dans le convecteur sont très silencieux. Souvent, pour des raisons architecturales, l'air soufflé est amené dans le convecteur depuis l'étage inférieur. Dans ce cas, une grande attention doit être accordée à la protection incendie, car les conduits d'air pénètrent dans les compartiments coupe-feu.

Dans les deux types de construction, l'air frais ou chaud est amené dans la pièce par l'intermédiaire de l'allège. L'allège étant un «endroit de stockage» apprécié, on y trouve souvent des objets tels que des piles de papier ou des pots de fleurs. En conséquence, l'air ne peut plus circuler librement et le convecteur fonctionne de manière limitée ou pas du tout.

En outre, en été, l'air directement au niveau du convecteur est très fortement refroidi, ce qui peut produire des courants d'air. De nombreux utilisateurs trouvent cela désagréable et se plaignent.

**Il est également important de noter** que la ventilation doit être en service pour que les convecteurs avec un raccordement de ventilation puissent refroidir.

### Refroidisseur à circulation d'air (à air recyclé)

Les refroidisseurs à circulation d'air sont les refroidisseurs de pièces les plus efficaces au niveau des coûts. Ils sont utilisés dans les pièces sans exigences de confort. Comme les refroidisseurs à circulation d'air fonctionnent avec des débits d'air importants et des températures d'air soufflé basses, ils sont très «compacts».



Dans le cas des refroidisseurs à circulation d'air sur les murs intérieurs et les allèges ainsi que des unités de plafond, il faut veiller à ce que la condensation puisse être éliminée. Il est préférable de le faire dans un écoulement avec une pente (gravitaire). On peut aussi utiliser de petites pompes à condensat, mais elles sont vulnérables. Il faut veiller à ce qu'elles soient facilement accessibles pour la maintenance, la réparation et le remplacement. En effet, si la pompe à condensat tombe en panne, le refroidisseur à circulation d'air sera bloqué.

### Systèmes de refroidissement de surface

En termes de confort, les systèmes de refroidissement de surface se sont imposés ces dernières années. Ils sont perçus comme un refroidissement doux et agréable car l'air de la pièce n'est pas déplacé de façon active. Le refroidissement est principalement basé sur le rayonnement de surface. La température est perçue comme étant jusqu'à 2 K plus basse qu'elle ne l'est en réalité.

Avec les systèmes de refroidissement de surface, des températures d'eau glacée élevées (18, 20 ou 22 °C) peuvent ainsi être utilisées pour obtenir une température de surface proche de la température ambiante souhaitée.

### Plafonds rafraîchissants

Les plafonds rafraîchissants constituent une solution de refroidissement efficace et rapide. Il faut toutefois tenir compte de la surface utilisable et surtout de la formation de condensat.

Il existe différentes solutions pour éviter la formation de condensat sur le plafond rafraîchissant:

- Installation d'une ventilation contrôlée du local avec déshumidification partielle de l'air soufflé.
- Installation obligatoire d'un contrôleur de condensat qui «déclenche» le plafond rafraîchissant dès que l'humidité dépasse une valeur critique.
- Commande et, si nécessaire, augmentation de la température de dé-

part du groupe «plafond rafraîchissant» au-dessus de la température du point de rosée. Cette augmentation entraîne simultanément une hausse de la température dans les pièces.

Lors du dimensionnement des plafonds rafraîchissants, il faut tenir compte de la double utilisation et de l'équipement du plafond, comme les appareils d'éclairage, les détecteurs de mouvement et d'incendie, les beamers ou les haut-parleurs. Ces appareils peuvent réduire considérablement la surface de refroidissement effectivement utilisable.

Les puissances de refroidissement des plafonds rafraîchissants sont de 50–80 W/m<sup>2</sup>. Avec les «systèmes haute performance» convectifs, on peut atteindre des puissances de pointe allant jusqu'à 130 W/m<sup>2</sup>. Dans le cas de systèmes aussi sophistiqués, il est conseillé d'examiner de près la situation avec le fournisseur pour voir si la puissance de refroidissement très élevée est atteinte.

### TABS et systèmes de refroidissement par le sol autorégulateurs

Éléments de construction thermoactifs (TABS) ou systèmes de refroidissement par le sol autorégulateurs fonctionnant avec des températures de départ d'environ 21 °C. Ces systèmes ne permettent pas de garantir les valeurs de consigne pour la température ambiante.

Le fonctionnement tout au long de la journée permet de réduire les pics de puissance (p.ex. à midi) par une puissance constante et donc plus faible. Toutefois, cet équilibrage de la charge entraîne une forte variation de la température ambiante (p.ex. 23 °C le matin et 26 °C le soir).

Les TABS et les systèmes de refroidissement par le sol autorégulateurs comptent parmi les systèmes d'absorption de chaleur les plus efficaces sur le plan énergétique. En outre, avec ces systèmes, il est possible de procéder à un transfert d'énergie dans le bâtiment, d'une pièce à l'autre et du jour à la nuit, pendant l'entre-saison.

### 6.3 Aperçu des systèmes de refroidissement

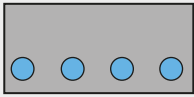
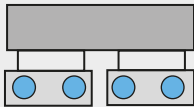
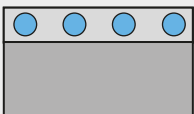
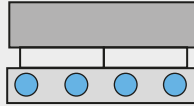

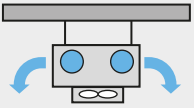
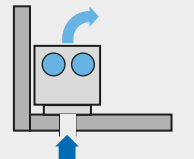
Extraction de chaleur avec de l'eau glacée	Fonction	Schéma	Avantages	Inconvénients
<b>Refroidissement par éléments de construction</b>				
Systèmes d'éléments de construction thermoactifs TABS	Refroidissement des éléments de construction avec activation de la masse		Bon marché, refroidissement statique vers le haut et vers le bas, jusqu'à 30 W/m <sup>2</sup>	Refroidissement parfois incontrôlé; intégration dans l'élément de construction en béton. Le plafond libre peut être problématique en termes de bruit.
Poutres et baffles de refroidissement	Panneau de refroidissement avec ou sans air primaire		Puissances plus élevées dans un espace réduit; occupation que partielle du plafond et donc activation du plafond comme accumulateur d'amortissement	Hauteur intérieure partiellement réduite; possibilité d'apparition de courants d'air dans les systèmes avec air primaire
Chauffage par le sol	Le chauffage par le sol est utilisé pour le refroidissement en été (uniquement pour la «régulation de la température»)		Bon marché, refroidissement statique; peu encombrant, à peine visible dans la pièce	Faible puissance, le point de rosée de l'air ambiant ne doit jamais être inférieur (dommages p. ex. aux planchers en bois)
<b>Plafonds rafraîchissants</b>				
Plafond rafraîchissant en dessous du plafond	Ouvert, avec activation des éléments de constructions, plafond convecteur		Refroidissement statique; parfois activation de la masse d'accumulation selon la section transversale libre (> 50%)	Nettoyage difficile; hauteur intérieure réduite
Plafond rafraîchissant, relié au plafond	Fermé, activation minimale de la masse Pas d'activation de masse avec les doubles plafonds		Bon marché, refroidissement statique; peu encombrant, à peine visible dans la pièce	Pas d'activation directe de la masse possible
<b>Refroidisseur à circulation d'air</b>				
Refroidisseur à circulation d'air	Ventilateur avec batterie de refroidissement		Avec évacuation du condensat, puissance élevée; solution bon marché	Émissions sonores dans la pièce; refroidissement sec avec puissance limitée; coûts de service, importants mouvements d'air (phénomènes de courant d'air)
<b>Installations existantes (uniquement pour la rénovation)</b>				
Appareil d'allège	Appareil à induction avec air primaire ou ventilateur		Puissance plus élevée dans un espace minimal; un seul élément pour le chauffage, le refroidissement et la ventilation avec air primaire	Parfois phénomènes de courant d'air, émissions sonores, plus gourmand en énergie, l'allège doit être planifiée, coûts de service

Illustration 6.7: Différents systèmes d'évacuation de froid. (Basés sur le tableau du livre Gebäudetechnik; von Euw, Alimpic, Hildebrand, 2012)

## 6.4 Intégration hydraulique

Lors de l'intégration hydraulique des systèmes d'absorption de chaleur (consommateurs), il convient de respecter les points suivants:

- La température de départ de chaque consommateur doit être réglée à la température définie.
- Plus la température de retour est élevée, mieux c'est.
- Si possible, la sortie doit être réglée par un contrôle du débit (vannes de passage).

**Important:** La régulation de la sortie ne doit jamais être faite avec des vannes de dérivation car elles ont un débit volumique constant. Cela entraîne des températures de retour basses et détériore donc l'efficacité de la machine frigorifique, car la puissance frigorifique ne peut plus être délivrée (de manière optimale).

**Remarque:** Dans de nombreux groupes de refroidissement par recirculation disponibles dans le commerce, les vannes de dérivation sont montées de façon standard. Sur ces modèles, il est recommandé de retirer la vanne de dérivation et de la remplacer par une vanne de passage.

Afin d'exploiter de manière optimale les consommateurs à débit variable, un découplage hydraulique entre le consommateur et la machine frigorifique est nécessaire.

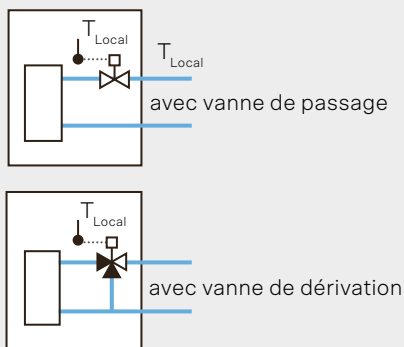


Illustration 6.8:  
Appareil frigorifique à recirculation avec vanne de passage et vanne de dérivation. La vanne est commandée par la sonde d'ambiance ( $T_{Local}$ ).

**Important:** Les machines frigorifiques nécessitent toujours un débit volumique minimum pendant leur fonctionnement. Cela s'applique également aux machines frigorifiques à puissance variable. Lorsque les débits volumiques traversant la machine frigorifique changent très rapidement (débits volumiques variables des consommateurs), même les machines à puissance variable atteignent leurs limites.

### Intégration des systèmes de refroidissement

Les consommateurs exigent toujours une régulation de la température de départ. Elle garantit qu'il n'y a pas de grandes fluctuations de température de départ et de retour dans le réseau de consommateurs avec les fluctuations correspondantes du débit volumique. Grâce à la régulation de la température de départ au niveau des groupes frigorifiques (circuit d'injection), la température de retour est «maintenue élevée», ce qui entraîne une meilleure efficacité de la machine frigorifique.

Même dans les systèmes ne comportant qu'un seul consommateur, il ne faut pas renoncer à la régulation de la température de départ pour des raisons de coût. Dans des cas exceptionnels, il est possible de renoncer à la régulation de la température de départ si l'on ne raccorde que des refroidisseurs d'un système de ventilation assurant une déshumidification partielle de l'air. Cela est dû au fait que la température de sortie de la machine frigorifique ne peut pas être réglée de manière assez précise malgré la régulation variable de la puissance.

### Intégration de refroidisseurs secs (registre d'air)

Les consommateurs pour le «refroidissement sec» exigent toujours une régulation de la température de départ. Cela permet d'éviter la condensation d'humidité au niveau des consommateurs.

### Températures de dimensionnement

Les machines frigorifiques sont généralement conçues avec un écart de température (température de départ et de retour) de 6 K. Lorsque les consommateurs présentent des différences de température plus faibles, il faut utiliser des débits volumiques plus importants dans le circuit de l'évaporateur pour pouvoir transporter la puissance frigorifique. Sinon, les débits volumiques plus importants des consommateurs entraînent un «mélange» indésirable de la température de l'eau glacée en aval de la machine frigorifique. Il s'agit d'un problème hydraulique et non d'un problème de performance de ladite machine.

Les différences de température entre les températures de départ et de retour des consommateurs varient en fonction de l'application. Dans les systèmes avec une température de départ

- de plus de 20 °C, on travaille avec des différences de température de 3 K
- de moins de 14 °C, on travaille avec des différences de température de 6 K
- entre 14 et 20 °C, les différences de température sont de l'ordre de 3 à 6 K.

**À noter:** En plus d'améliorer l'efficacité, des températures de retour élevées peuvent toutefois entraîner des problèmes. Des températures d'entrée trop élevées dans la machine frigorifique entraînent des dysfonctionnements (notamment de la haute pression). Pour éviter que cela ne se produise, la température maximale admissible à l'entrée de la machine frigorifique doit être limitée. Cela peut être facilement résolu hydrauliquement avec une régulation d'entrée (voir Chap. «Systèmes hydrauliques»).

## 6.5 Systèmes de refroidissement alternatifs

Les sources de refroidissement naturelles sont les plus performantes en termes d'efficacité énergétique. Les sources les plus importantes:

- Géo-cooling (refroidissement par le sol, eaux souterraines)
- Aqua-cooling (eau de lac et de rivière)
- Free-cooling (refroidissement par air)

Avec les «sources de refroidissement» naturelles, la dynamique des saisons avec leurs différentes températures joue un rôle important dans la conception et la planification.

Toutes les sources naturelles de refroidissement et de chaleur peuvent être utilisées à la fois pour le refroidissement en été et pour le chauffage en hiver (utilisation comme source d'énergie dans le fonctionnement des pompes à chaleur).

### Refroidissement par le sol (Géo-cooling)

Pour exploiter le sol pour le refroidissement, des sondes géothermiques pouvant atteindre 250 mètres de long sont enfoncées dans le sol. L'eau est refroidie par les sondes géothermiques en été. Il faut savoir que la température du sol augmente d'environ 3 K par 100 mètres de profondeur.

Le terrain autour des sondes agit comme un réservoir saisonnier inerte. Les températures changent tout au long de l'année. En règle générale, le terrain autour des sondes est le plus frais en avril (p. ex. 4 °C). En été, lorsque le sol est exploité

pour le refroidissement, il se réchauffe (p. ex. jusqu'à 18 °C en août). Il est important qu'en hiver, la même quantité d'énergie que celle stockée en été soit à nouveau extraite. Pour pouvoir assurer des résultats fiables, il est nécessaire de procéder à une simulation des sondes géothermiques.

La puissance de refroidissement d'une sonde géothermique est donc limitée. Lorsqu'une température d'eau glacée constante est requise tout au long de l'année (p. ex. 14 °C max.), le refroidissement doit pouvoir être relayé par une machine frigorifique à partir d'une certaine température de sonde.

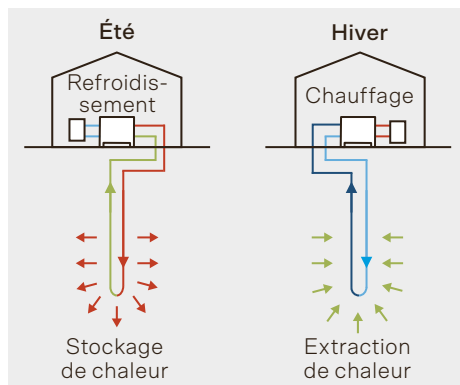
### Refroidir avec l'eau du lac

Lorsqu'on utilise l'eau du lac pour refroidir, il faut la capter à une profondeur d'environ 30 mètres. La profondeur effective requise dépend des conditions locales et de la température annuelle du lac. Les points suivants doivent être pris en compte:

- L'utilisation est soumise à une concession et à une autorisation.
- Selon la situation, l'eau du lac à une profondeur de 30 mètres, dont la température est de 4 °C en mars, peut se réchauffer à plus de 10 °C à la fin de l'été.
- Il existe éventuellement une température maximale pour l'eau restituée après refroidissement (p. ex. 30 °C au max.).
- Il faut prendre des précautions pour protéger la faune piscicole (maillage minimal des prises d'eau, vitesse d'écoulement etc.).
- Il est souvent nécessaire d'apporter la preuve que la chaleur ne peut pas être exploitée.

**Remarque:** En cas d'utilisation de l'eau du lac, il faut veiller à ce que les moules zébrées ou leurs larves ne migrent pas dans les échangeurs de chaleur par la conduite d'aspiration. Les moules dans les échangeurs de chaleur entraînent des dysfonctionnements et augmentent les coûts de maintenance. Pour un captage d'eau de lac, il faut donc prévoir des

Illustration 6.9:  
Refroidissement en été (apport de chaleur) et chauffage en hiver (extraction de chaleur) grâce à une sonde géothermique.



filtres spéciaux lavables par contre-pression, des dispositifs de nettoyage et un espacement des plaques suffisamment grand dans l'échangeur de chaleur.

#### Refroidir avec les eaux souterraines

Les eaux souterraines ont des températures stables. Les eaux souterraines constituent donc une très bonne source d'eau glacée, directement utilisable. Selon les cantons, les eaux souterraines sont protégées par des réglementations très différentes:

- Pas d'utilisation pour le refroidissement possible
- Refroidissement avec un écart de température maximal de 3 à 4 K
- Vérification du rendement de la puissance par des essais de pompage
- Preuve hydrologique du comportement de l'écoulement thermique des eaux souterraines
- En règle générale, les systèmes d'eaux souterraines et de lac sont approuvés pour une puissance frigorifique de 400 kW min. (conditions d'autorisation).

**Le free-cooling le plus efficace consiste à insuffler de l'air frais dans le bâtiment la nuit via le système de ventilation (sans utiliser le réseau d'eau glacée).**

#### Quand le free-cooling est-il utile?

Une étude ZHAW sur le thème du free-cooling dans la climatisation a examiné le potentiel du free-cooling indirect. Les résultats montrent que la température de départ du médium de refroidissement est déterminante pour savoir si le free-cooling est intéressant ou non. Lorsque des températures de consommation inférieures à 14 °C sont requises, le potentiel de free-cooling tombe à quelques pourcent de l'énergie de refroidissement totale pour la climatisation ( $T_{\text{Extérieur mode été}} > 20\text{ °C}$ ).

**En conclusion:** Ce n'est pas parce que le free-cooling est un terme à connotation positive que l'installation d'un free-cooling indirect est économiquement et énergétiquement judicieuse dans tous les cas.

**Source:** Free Cooling in der Klimakälte, Stefan Rohrer, Martin König et Frank Tillenka ZHAW, 2018 (sur mandat de l'OFEN)

#### Refroidissement direct avec l'air extérieur (free-cooling)

L'air extérieur frais est soufflé directement dans le bâtiment par le système de ventilation et la chaleur excédentaire est évacuée par l'air rejeté. Ce refroidissement naturel avec l'air extérieur la nuit est un pré-refroidissement précieux. Cependant, il n'est souvent pas suffisant pour évacuer toute la chaleur de la journée (voir Chap. 7.5 Free-cooling).

#### Refroidissement indirect avec l'air extérieur (free-cooling)

Dans le cas du refroidissement indirect avec l'air extérieur, l'énergie est transportée par le système frigoporteur. Dans ce cas, la machine frigorifique n'est pas en service ou seulement à titre de soutien.

- **Risque de gel:** Lorsque le free-cooling fonctionne avec un air extérieur froid de moins de 1 °C, il faut s'assurer qu'aucun système ne gèle. Ceci est réalisé par une commutation et une régulation hydraulique appropriée.
- **Petits écarts de température:** Afin d'utiliser au mieux le free-cooling, il est dimensionné avec de faibles écarts de température de 3 à 4 K. Toutefois, cela nécessite des débits volumiques importants et des sections de tuyaux correspondantes.
- **Échangeurs de chaleur:** Les échangeurs de chaleur doivent être dimensionnés pour des écarts de température entre le côté primaire et le côté secondaire inférieurs à 2 K et une différence de pression maximale de 20 kPa.

#### Intégration hydraulique du free-cooling

L'intégration hydraulique du free-cooling avec une machine frigorifique peut se faire en parallèle comme une machine frigorifique ou en série comme un «pré-refroidisseur» (voir Chap. 8: Systèmes hydrauliques). Dans tous les cas, il s'agit d'une opération exigeante sur le plan hydraulique et technique, car la machine frigorifique réagit de manière très sensible à de fortes variations ou fluctuations de température.

## 10 points relatifs à l'absorption de chaleur

1. Lors de la conception du système d'absorption de chaleur, les températures utiles (p. ex. les températures ambiantes) sont prises comme base.
2. Une température de départ d'eau glacée de 6 à 10 °C est nécessaire pour une déshumidification contrôlée de l'air. Seules quelques utilisations spéciales nécessitent une déshumidification contrôlée (musées, laboratoires etc.).
3. Avec des températures d'eau glacée de 10 °C et plus, l'air peut être partiellement déshumidifié (déshumidification partielle pendant la ventilation).
4. Pour les installations de ventilation, des températures d'eau glacée de 14 °C sont généralement idéales (refroidissement sans déshumidification).
5. Pour les installations de refroidissement dont la température de départ est supérieure à 20 °C, on travaille avec des différences de température de 3 K entre la température de départ et celle de retour.
6. Lorsque différentes températures d'eau glacée sont requises, la différence de température (à partir de 4 K) et la proportion de la production totale (proportion considérable) déterminent si un réseau d'eau glacée séparé, plus chaud, doit être construit pour les groupes «plus chauds».
7. Les systèmes de refroidissement de surface sont perçus comme un rafraîchissement agréable car l'air de la pièce n'est pas déplacé de façon active.
8. Les refroidisseurs à recirculation d'air sont des systèmes de refroidissement rentables et puissants, mais les émissions sonores et les coûts d'entretien doivent toutefois être examinés attentivement.
9. L'exploitation de l'eau du lac ou de la nappe phréatique pour le refroidissement est soumise à autorisation.
10. Le free-cooling indirect n'est généralement intéressant que pour les systèmes de climatisation de confort dont la température de l'eau glacée est supérieure à 14 °C.

# Dégagement de chaleur

**Toute planification d'installation de climatisation présuppose une clarification minutieuse de la question de savoir si et comment la chaleur du processus de refroidissement – une véritable «énergie gratuite» – peut être utilisée dans le bâtiment ou dans les locaux. Lorsque la chaleur ne trouve pas d'utilisateurs, elle doit être évacuée de manière efficace et économique.**

## 7.1 Considérations conceptuelles

Il est incontesté que la chaleur dégagée par une machine frigorifique devrait être utilisée si possible dans le bâtiment lui-même. C'est également ce que prévoit la loi sur l'énergie, à condition que l'exploitation de la chaleur soit économique. Dans les constructions nouvelles, un minimum de la chaleur peut toujours être exploitée.

Les seules exceptions à cette exigence (légale) sont les bâtiments ne requérant aucun besoin de chaleur pendant le refroidissement ou ceux nécessitant une température de départ supérieure à 65 °C (bâtiments anciens).

Dans la prise en compte globale de l'énergie du bâtiment, il ne devrait pas y avoir de processus de refroidissement avec un «excès» de chaleur lorsqu'un chauffage à énergie fossile est utilisé dans le même bâtiment au même moment. En particulier, les bâtiments à usage mixte (résidentiels, bureaux, commerces) ont toujours un potentiel utilisable pour exploiter une partie ou la totalité de la chaleur du processus de refroidissement.

### Pyramide des utilisations de chaleur

Différentes températures sont nécessaires en fonction de l'application. Plus les exigences en matière de température des consommateurs de chaleur sont faibles, plus le processus de refroidisse-

ment et l'efficacité énergétique de l'installation frigorifique sont améliorés.

### Remarques

- Les températures maximales des chauffages des locaux dans les nouveaux bâtiments, qui seront encore autorisées conformément à la loi sur l'énergie, seront probablement réduites à 40 °C dans un avenir prévisible. Pour les chauffages par le sol, une limite supérieure de 35 °C s'applique déjà aujourd'hui.
- Des températures plus basses (p.ex. 30 °C) sont suffisantes, lorsqu'il s'agit uniquement de préchauffer l'eau chaude sanitaire. Toutefois, ces systèmes doivent être soigneusement contrôlés sur le plan de l'hygiène (mot-clé: légionelles) et de l'économie (accumulateur nécessaire).

L'exploitation judicieuse de la chaleur de la machine frigorifique est toujours dérivée conceptuellement du besoin de chaleur du bâtiment. Les points suivants doivent être clarifiés:

- Températures des consommateurs de chaleur
- Quantités de chaleur nécessaires
- Moment du besoin de chaleur (simultanéité)

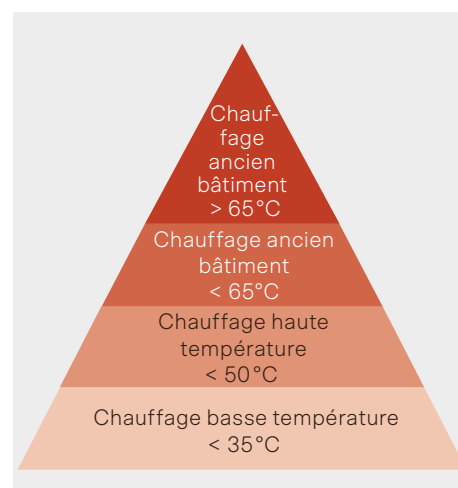


Illustration 7.1: Pyramide des exigences de température des différents systèmes de chauffage. Plus la pyramide est haute, plus la production de chaleur avec la machine frigorifique est exigeante.



Lorsque la chaleur ne peut pas être utilisée immédiatement, il faut envisager un stockage saisonnier, par exemple avec des sondes géothermiques. Ce n'est qu'ensuite que se pose la question de savoir comment la chaleur dégagée par les machines frigorifiques pourra être efficacement évacuée.

La condition préalable la plus importante pour l'exploitation de la chaleur de la machine frigorifique est de connaître les points d'utilisation et de consommation de chaleur à l'intérieur d'un bâtiment. Sur la base de ces informations, une comparaison chaleur-refroidissement est effectuée – les consommateurs de chaleur et de froid sont enregistrés et comparés afin d'établir un bilan sur 24 heures. Il est ainsi possible d'équilibrer les performances et les flux d'énergie et de définir les composants de l'installation. Cette comparaison est expliquée plus en détail au Chapitre 7.3.

Les principes d'exploitation de la chaleur des machines frigorifiques sont basés sur l'illustration 7.2.

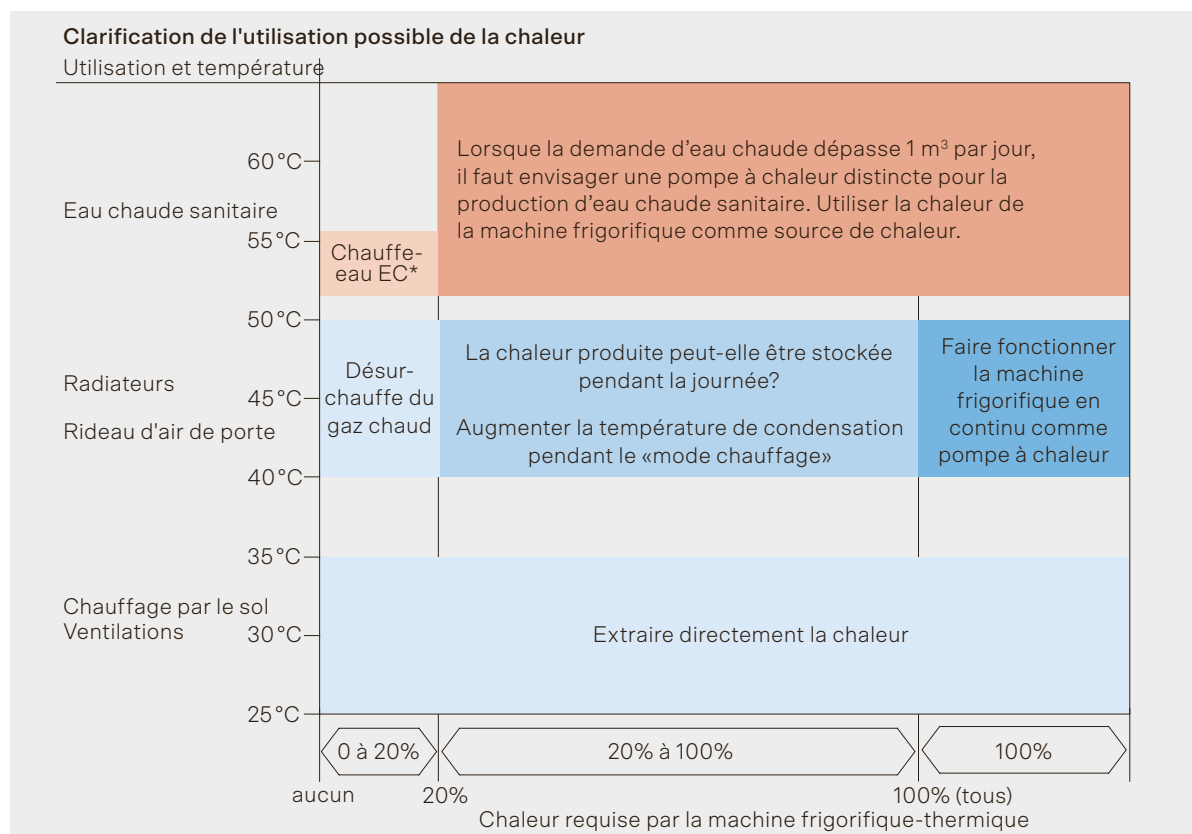
### Influence de la température de condensation sur l'efficacité économique

Lorsque la température de condensation ne doit pas être augmentée pour l'exploitation de la chaleur, la chaleur de condensation de la machine frigorifique est gratuite. Dans la pratique, cette situation est particulièrement fréquente dans les bâtiments à usage mixte.

Lorsque la température de condensation de l'installation frigorifique doit être augmentée pour l'exploitation de la chaleur, il faut alors de l'énergie. Pour chaque degré d'augmentation de la température, la consommation d'électricité augmente d'environ 2,5%.

**Exemple:** Lorsque la chaleur est requise à un niveau de température supérieur de 10 K au niveau de condensation effectif, la consommation d'énergie de l'installation frigorifique pour ladite augmentation s'accroît alors de 25%. Lorsque la chaleur est ainsi entièrement utilisée, l'énergie électrique supplémentaire correspond à un «coefficient de performance»

Illustration 7.2:  
Aperçu des différentes manières d'utiliser la chaleur de la machine frigorifique-thermique pour différents usages.  
  
\* Envisager un chauffe-eau PAC lorsque la consommation d'eau chaude sanitaire est inférieure à 1000 litres par jour.



de 4. Dans ce cas, la chaleur n'est pas gratuite, mais elle est beaucoup plus économique (c.-à-d. moins chère) et écologique que la chaleur provenant d'un chauffage à énergie fossile.

**Diminuer l'efficacité du refroidissement en augmentant la température de condensation peut améliorer l'efficacité globale du bâtiment.**

**Perte d'efficacité «rentable»**

Autre exemple: Le besoin de puissance de chauffage d'un bâtiment est de 60 kW en hiver. La machine frigorifique produit 20 kW de froid (5 kW<sub>él</sub>) en fonctionnement à charge partielle. La température de retour du chauffage est de 30 °C. Et le circuit de post-refroidissement fonctionne à 28 °C (température de condensation).

**Variante A: Solution conventionnelle**

Une chaudière à gaz est installée pour le chauffage et une machine frigorifique pour le refroidissement.

	Chaleur	Électr.	Froid
<b>Chaudière à gaz</b>	60 kW		
<b>Machine frigorifique</b>		5 kW	20 kW
<b>Total</b>	<b>60 kW</b>	<b>5 kW</b>	<b>20 kW</b>

Lorsque l'électricité est pondérée avec un facteur 2 conformément à Minergie, on obtient une puissance totale absorbée de 70 kW (60 kW + 2 fois 5 kW). Sans pondération, cette puissance est de 65 kW (60 kW + 5 kW).

**Variante B: Combinaison avec l'augmentation de la température de condensation**

Une chaudière à gaz est installée et la chaleur de la machine frigorifique est utilisée. La température de condensation de la machine frigorifique doit être augmentée de 8 K pour atteindre 36 °C (au lieu de 28 °C). Cela détériore l'efficacité de la machine frigorifique – elle a besoin d'environ 20% d'énergie électrique en plus (8 fois 2,5% = 20%).

Ainsi, au lieu de 5 kW, la machine frigorifique a maintenant besoin de 6 kW d'énergie électrique (puissance de refroidissement de 20 kW) et produit 26 kW de puissance thermique utilisable (20 kW + 6 kW).

	Chaleur	Électr.	Froid
<b>Chaudière à gaz</b>	34 kW		
<b>Machine frigorifique</b>	26 kW	6 kW	20 kW
<b>Total</b>	<b>60 kW</b>	<b>6 kW</b>	<b>20 kW</b>

Lorsque l'électricité est pondérée avec un facteur 2 conformément à Minergie, on obtient une puissance totale absorbée de 46 kW (34 kW + 2 fois 6 kW). Sans pondération, cette puissance est de 40 kW (34 kW + 6 kW).

Le bilan montre que: L'intégration de la chaleur de la machine frigorifique conduit – malgré la perte d'efficacité due à l'augmentation de la température de condensation – à une dépense énergétique inférieure de 38% (sans pondération, avec pondération c'est 33% de moins).

Lorsque la variante B est considérée uniquement du point de vue du froid, le COP de la machine frigorifique se détériore de 4,0 à 3,3.

$$\text{Variante A: } \text{COP}_{\text{Froid}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Froid}})}{(5 \text{ kW}_{\text{él}})} = 4,0$$

$$\text{Variante B: } \text{COP}_{\text{Froid}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Froid}})}{(6 \text{ kW}_{\text{él}})} = 3,3$$

Cependant, la variante B fournit 26 kW supplémentaires de chaleur utilisable. Lorsque l'on répartit la totalité de la consommation électrique (6 kW) de la variante B entre le refroidissement (5 kW) et le chauffage (1 kW), on obtient le résultat suivant:

$$\text{Variante B: } \text{COP}_{\text{Froid}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Froid}})}{(5 \text{ kW}_{\text{él}})} = 4,0$$

$$\text{Variante B: } \text{COP}_{\text{Chaleur}} = \frac{(26 \text{ kW}_{\text{Chaleur}})}{(1 \text{ kW}_{\text{él}})} = 26$$

L'augmentation de la température de condensation permet donc d'obtenir le même COP<sub>Froid</sub> de 4,0 et simultanément

un COP de 26 (à savoir: produit avec 1 kW d'électricité produit 26 kW<sub>Chaleur</sub>)  
Lorsque l'on considère l'ensemble du système de refroidissement et de chauffage, le résultat est un très bon COP<sub>Froid + Chaleur</sub> de 7,7.

$$\text{COP}_{\text{Froid + Chaleur}} = \frac{(46 \text{ kW}_{\text{Froid + Chaleur}})}{(6 \text{ kW}_{\text{éI}})} = 7,7$$

### Augmentation encore plus importante de la température de condensation

Le niveau auquel la température de condensation peut être élevée dépend d'une part du fluide frigorigène (voir Chap. 3 Principes fondamentaux, point 3.8). D'autre part, il faut également tenir compte des aspects économiques.  
Lorsqu'une température de condensation de 60 °C est requise comme dans l'exemple ci-dessus, la machine frigorifique doit fournir une augmentation de température considérable de 32 K (60–28 °C). Cela correspond à une puissance électrique supplémentaire d'environ 80 % (32 K fois 2,5%).

	Chaleur	Électr.	Froid
<b>Chaudière à gaz</b>	31 kW		
<b>Machine frigorifique</b>	29 kW	9 kW	20 kW
<b>Total</b>	<b>60 kW</b>	<b>9 kW</b>	<b>20 kW</b>

Lorsque l'électricité est pondérée avec un facteur 2 conformément à Minergie, on obtient une puissance totale absorbée de 49 kW (31 kW + 2 fois 9 kW). Sans pondération, cette puissance est de 40 kW (31 kW + 9 kW). Dans ce cas également, le bilan montre une amélioration de l'efficacité de 30 % par rapport à une solution sans exploitation de la chaleur.

### Important

- L'augmentation de l'efficacité globale dans les exemples n'est donnée qu'avec l'exploitation complète de la chaleur de la machine frigorifique.
- La machine frigorifique doit être dotée d'une commande garantissant que la température de condensation n'est relevée que lorsqu'il y a un besoin de chaleur.
- Les températures de chauffage doivent être définies aussi basses que possible.

### Utilisation de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire est nécessaire dans presque tous les bâtiments. Dans les immeubles de bureaux, le besoin en eau chaude est généralement si faible que l'intégration d'une récupération de chaleur n'est pas rentable. Cependant, dès que la demande d'eau chaude sanitaire dépasse 1 m<sup>3</sup> par jour, il faut envisager d'utiliser au moins un désurchauffeur de gaz chaud pour préchauffer l'eau chaude sanitaire (voir Illustr. 7.9 Désurchauffage de gaz chaud).

Lorsque la demande d'eau chaude sanitaire est faible, on peut utiliser une pompe à chaleur (PAC) pour l'eau chaude sanitaire. Elle a deux effets positifs. Tout d'abord, elle refroidit la salle des machines en soutirant la chaleur de la pièce. Ensuite, le besoin d'eau chaude sanitaire ne doit pas nécessairement coïncider dans le temps avec le besoin de chaleur. Le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) tient une liste des chauffe-eau pompes à chaleur (chauffe-eau pompes à chaleur) certifiées GSP. Pour être inclus dans la liste, les produits doivent répondre aux exigences techniques du GSP ([www.fws.ch](http://www.fws.ch)).

### Dégagement de chaleur vers le chauffage et l'aéroréfrigérant

La régulation de la machine frigorifique comprend non seulement la charge de l'accumulateur de froid mais aussi la charge de l'accumulateur de chauffage. Elle a lieu lorsqu'il y a une demande réelle de chaleur.

Pour que la machine frigorifique puisse assurer ses fonctions, la gestion de l'accumulateur (refroidissement et chauffage) doit être contrôlée par celle-ci. Elle-même est alors uniquement commandée par les exigences de chaleur et de température du chauffage.

Afin de toujours utiliser pleinement la chaleur de machine frigorifique, celle-ci doit être évacuée directement dans l'accumulateur de chauffage. Lorsque l'accumulateur thermique est chargé, la chaleur excédentaire est évacuée par post-refroidissement. Dans ce cas, post-refroidissement est ajouté comme un «consommateur de chaleur».

En mode post-refroidissement, la température de l'aéroréfrigérant dans la machine frigorifique (température d'entrée du condenseur) doit toujours être aussi basse que possible. La régulation doit garantir que les températures suivent la température extérieure.



Illustration 7.3:  
La pompe à chaleur pour eau chaude sanitaire extrait la chaleur de la pièce et l'utilise pour chauffer l'eau chaude sanitaire. (Source: CTA)

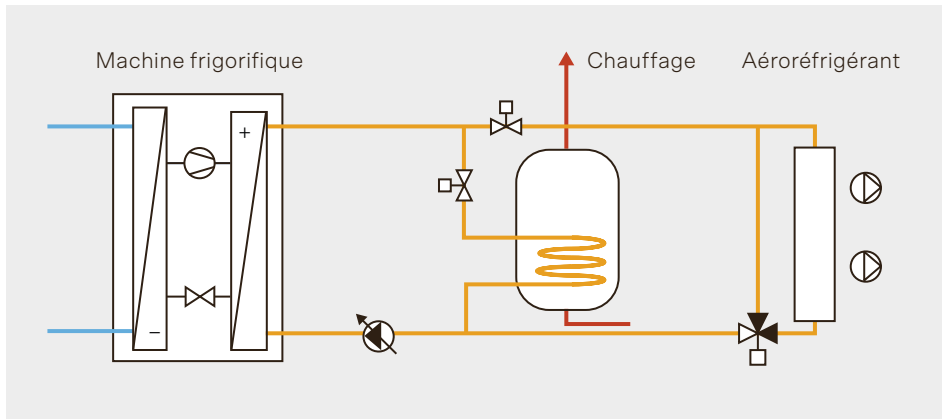


Illustration 7.4: Intégration indirecte du chauffage via un accumulateur thermique et avec un circuit d'eau glycolée. Attention: L'échangeur de chaleur multitubulaire interne ne peut être utilisé que jusqu'à une puissance d'environ 20 kW. De plus, ses valeurs de transfert thermique sont plutôt médiocres ( $\Delta T$  5 à 10 K).

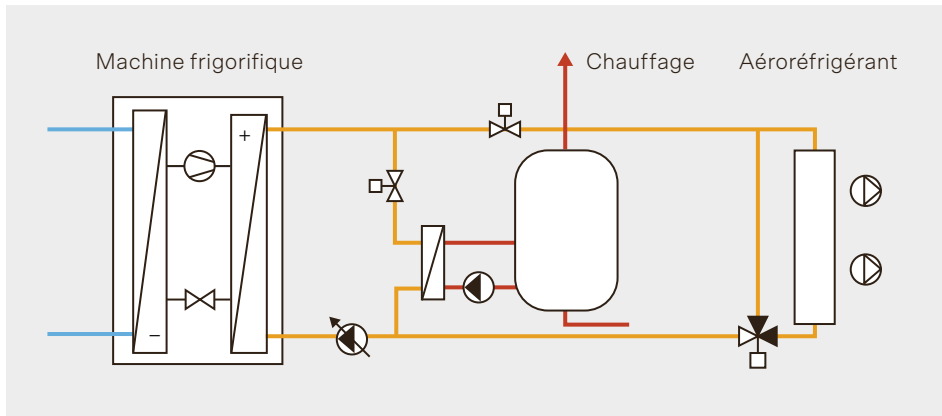


Illustration 7.5: Intégration indirecte du chauffage via un accumulateur thermique et avec un circuit d'eau glycolée. L'échangeur de chaleur à plaques externe nécessite une pompe supplémentaire. En revanche, il peut être utilisé pour n'importe quelle puissance et présente de bonnes valeurs de transfert thermique ( $\Delta T$  2 K).

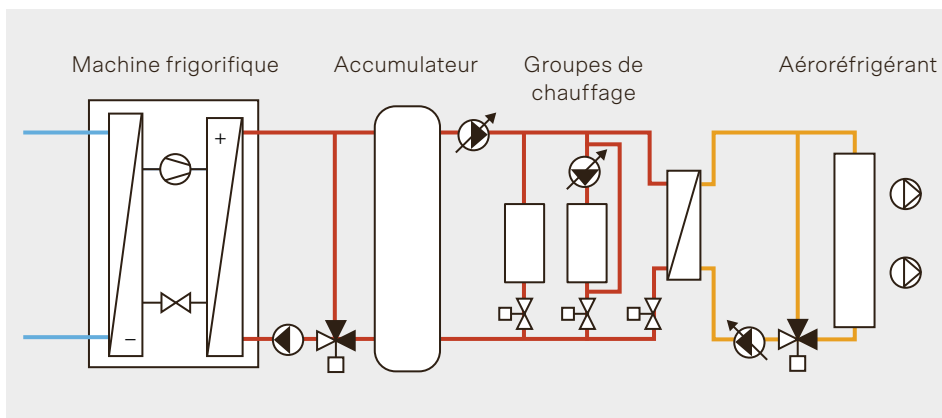


Illustration 7.6: Intégration directe du chauffage via un accumulateur thermique. l'aéroréfrigérant est intégré à un échangeur de chaleur comme un groupe de chauffage. Le circuit de refroidissement est rempli d'eau glycolée afin que l'eau ne gèle pas en hiver.

### Production frigorifique compacte montée sur la toiture

Les productions frigorifiques compactes montées sur la toiture (appelés unités, roof-top) présentent un avantage important: grâce à leur conception compacte, ils nécessitent peu d'espace car le circuit de post-refroidissement et la commande sont intégrés.

Il convient de noter que les raccords d'eau glacée et de chauffage mènent à l'extérieur et doivent être protégés en conséquence contre le gel. La protection contre le gel est judicieusement assurée par des mélanges eau-glycol et non par des rubans chauffants électriques.

Dans le bâtiment, le réseau de conduites avec le mélange eau-glycol doit être le plus court possible (fuites, interventions etc.). Pour cette raison, l'échangeur de chaleur (séparation du système d'eau et du système eau-glycol) devrait idéalement être placé dans la zone chaude, directement à l'endroit où les conduites entrent dans le bâtiment.

Pour des raisons économiques, la récupération de chaleur n'est souvent pas intéressante avec les unités compactes. Cela s'explique en partie car la majorité des centrales de chauffage sont situées au sous-sol et non dans la toiture. En outre, les machines compactes – tout comme les aéroréfrigérants – doivent

respecter les niveaux sonores spécifiés. Les unités compactes sont toujours plus bruyantes que les aéroréfrigérants seuls, car il s'y ajoute le bruit des compresseurs.

#### Avantages

- Unité compacte sur la toiture (condensation directe avec régulation)
- La réfrigération et la condensation directe ont des coûts d'investissement très bas
- Faibles coûts d'exploitation et de maintenance
- Gain d'espace dans le bâtiment
- Les modèles actuels sont déjà pour la plupart dotés d'un circuit de free-cooling intégré.

#### Inconvénients

- L'exploitation de la chaleur n'est souvent pas économique
- Protection des raccords d'eau contre le gel
- Niveaux de bruit plus élevés que les aéroréfrigérants seuls
- Les coûts des travaux doivent être pris en compte dans l'emplacement de l'unité de refroidissement et l'aménagement induit du bâtiment.



Illustration 7.7:  
Refroidisseur compact installé directement sur la toiture.  
(Photo: Wolf Schweiz AG)

## 7.2 Exploitation directe de la chaleur

Lorsque le planificateur a décidé par principe d'exploiter la chaleur de la machine frigorifique, les conditions préalables doivent être étudiées dans la planification spécifique au projet. Il faut veiller tout particulièrement à ce que la chaleur de la machine frigorifique et les consommateurs de chaleur soient techniquement proches les uns des autres et que les systèmes se complètent. La proximité technique par un raccordement de conduites aisé répond au critère de rentabilité et donc à l'une des exigences les plus importantes en matière de planification.

Illustration 7.8: La machine frigorifique charge un accumulateur thermique à 50 °C et un autre à 35 °C. Lorsqu'un accumulateur thermique signale une demande, la température de condensation de la machine frigorifique est portée au niveau de température correspondant. Cela permet de toujours atteindre une efficacité maximale. Les différents consommateurs ou groupes de consommateurs tirent la chaleur de l'accumulateur respectif en fonction de la demande de température.

### Différents niveaux de température

Lorsqu'un bâtiment nécessite différents niveaux de température, ils doivent être individualisés sur le plan hydraulique. La

répartition se fait par le biais de groupes de consommateurs indépendants et d'un approvisionnement correspondant à partir des accumulateurs de température respectifs.

### Exploitation de la chaleur provenant de la désurchauffe des gaz chauds

Comme son nom l'indique, la désurchauffe des gaz chauds est le niveau de température le plus élevé du processus de refroidissement pouvant être découpé. Lors du découplage du processus de froid, seule la chaleur sensible contenue dans le fluide frigorigène gazeux est utilisée. La température du gaz chaud utilisable dépend du fluide frigorigène, de la température d'évaporation et de condensation et de la puissance de la machine frigorifique. Il convient de noter: en fonctionnement à charge partielle, la température des gaz chauds diminue.

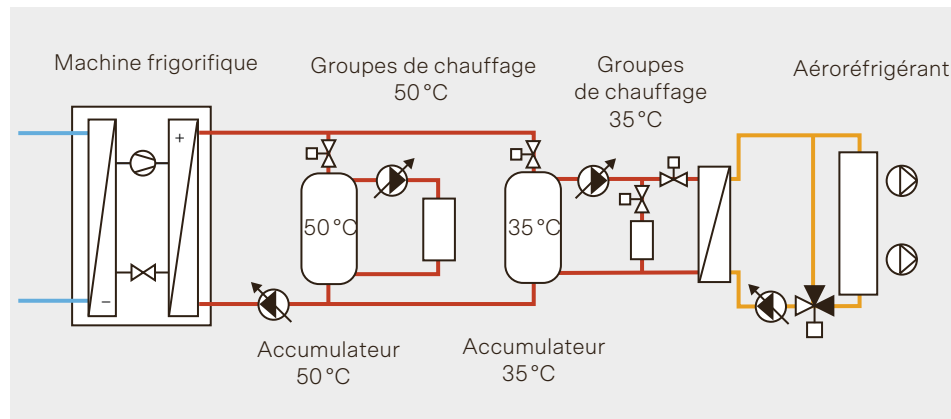
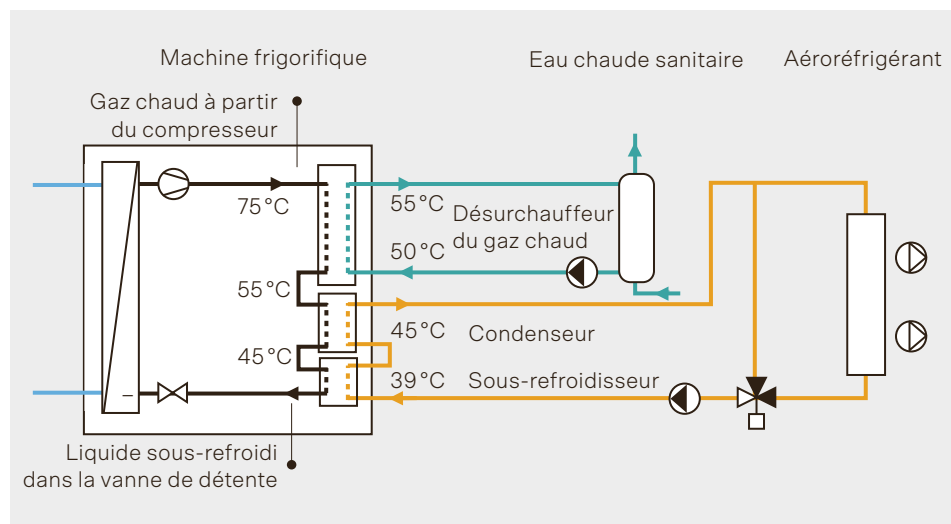


Illustration 7.9: 10 à 20% de la puissance du condenseur peuvent être extraits par le gaz chaud. Celui-ci a une température utile plus élevée et constitue donc une source de chaleur intéressante pour chauffer l'eau sanitaire.



Les gaz chauds ont une température comprise entre 40 et 100 °C, selon le fluide frigorigène. La température des gaz chauds est toujours supérieure à la température de condensation et atteint des valeurs très élevées lorsque les températures de condensation sont hautes et les rapports de pression du compresseur importants.

À titre indicatif, on peut supposer que la température minimale des gaz chauds est de 10 à 15 K supérieure à la température de condensation. Avec un désurchauffeur de gaz chauds, il est possible de réduire la puissance du condenseur de 10 à 20 %.

La désurchauffe des gaz chauds est une option secondaire du point de vue du processus de froid. Le processus fonctionne également lorsque le désurchauffeur n'est pas exploité. Dans ce cas, la chaleur est simplement évacuée par le condenseur.

Les températures de chaleur relativement élevées pendant la désurchauffe des gaz chauds peuvent être utilisées sans avoir d'impact négatif sur l'efficacité du processus de refroidissement ou l'efficacité énergétique de la machine frigorifique. Lorsque la chaleur est exploitée, elle n'a pas besoin d'être fournie par une autre source d'énergie (p. ex. le chauffage au mazout). Cela améliore l'efficacité globale du bâtiment.

### Découplage des systèmes

Dans certains cas, l'utilisation indirecte de la chaleur de la machine frigorifique doit être pilotée. C'est le cas lorsque cette chaleur est engendrée avec un décalage par rapport au besoin de chaleur du bâtiment ou lorsque seule une fraction peut être utilisée pour le chauffage. Dans ces cas, une solution rentable et efficace peut être trouvée avec une petite pompe à chaleur – utilisant la chaleur de la machine frigorifique comme source (voir également l'illustr. 7.3 Pompe à chaleur pour eau chaude sanitaire). Une temporisation peut être couplée avec un accumulateur de chaleur (voir Chap. Accumulateur).

**Remarque:** Dans l'illustration 7.10, le fluide caloporteur est un réseau de glycol qui ne gèle pas dans l'aéroréfrigérant en hiver. Le glycol a aussi son prix et un remplissage peut rapidement coûter plusieurs milliers de francs. À cet égard, il faut toujours vérifier si l'aéroréfrigérant peut être intégré à une séparation supplémentaire du système (échangeur de chaleur à plaques) et ainsi réduire le volume du circuit de glycol. Les économies de glycol peuvent être supérieures aux coûts supplémentaires de l'échangeur de chaleur à plaques.

Une autre solution consiste à intégrer à la production de froid une petite machine frigorifique ( $MF_{\text{petit}}$ ) fournissant la chaleur sous forme de pompe à chaleur, même si elle ne peut à elle seule garantir une production fiable (Illustr. 7.11). La petite pompe à chaleur produisant du froid est cependant très efficace en termes de fonctionnement et d'intégration et évite à la grande machine frigorifique ( $MF_{\text{grand}}$ ) de nombreux démarrages et arrêts, en particulier dans la plage de puissance basse. Ainsi, la petite machine frigorifique, avec ses faibles coûts d'exploitation, augmente également la durée de vie de la machine frigorifique principale. Toutefois, cette solution techniquement bonne entraîne des coûts d'investissement un peu plus élevés.



Illustration 7.10:  
Lorsque seule une petite partie de la chaleur de la machine frigorifique est nécessaire pour le chauffage, il n'est souvent pas utile de faire fonctionner la machine jusqu'à une température de condensation plus élevée, car cela entraînerait un apport de chaleur beaucoup trop important pendant une courte période. Dans ce cas, une petite pompe à chaleur peut fournir la chaleur de manière très efficace.

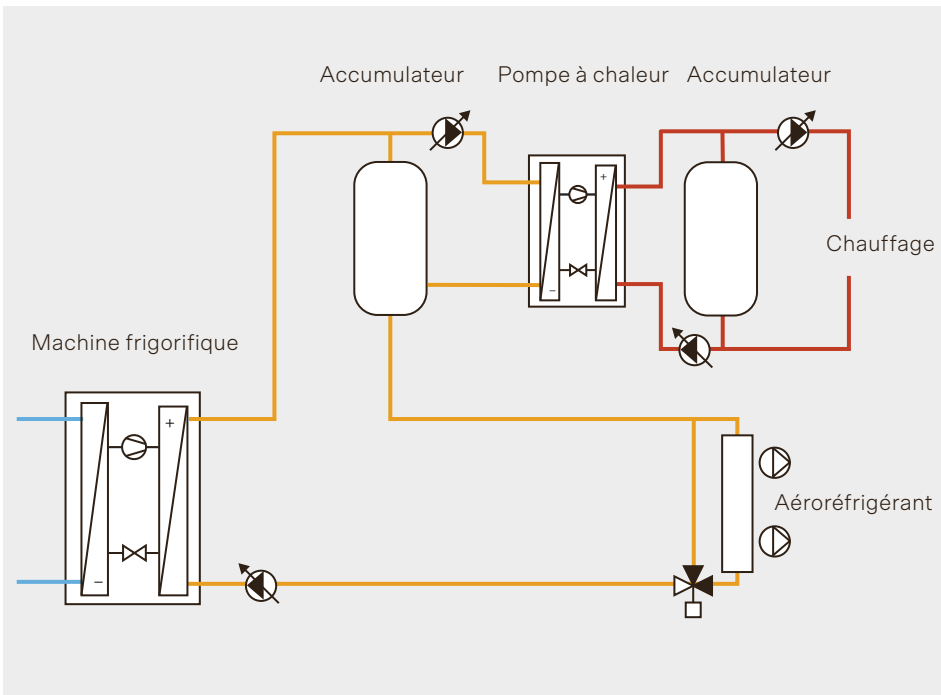
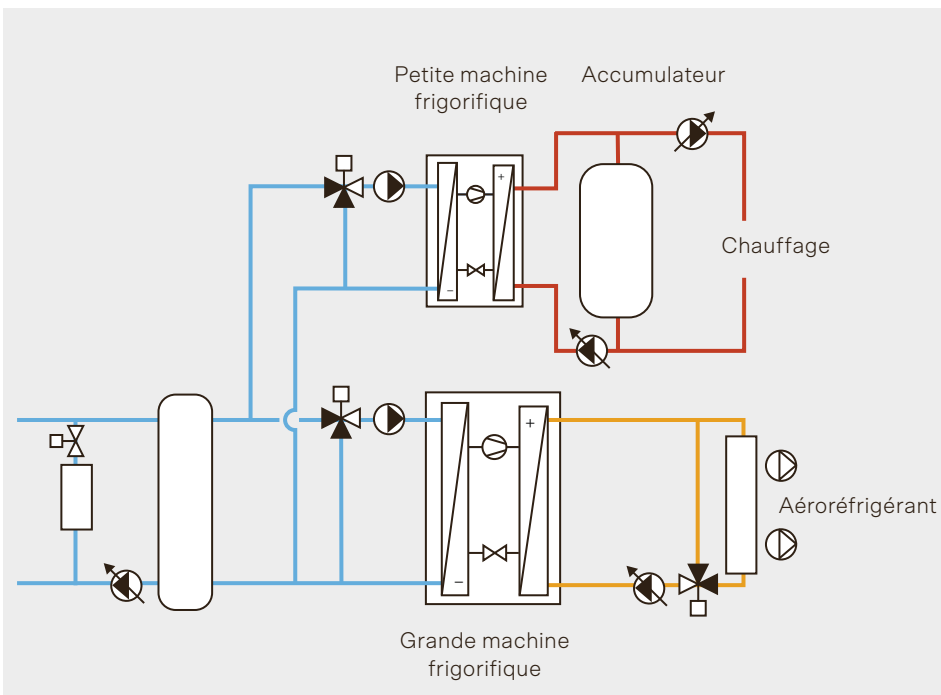


Illustration 7.11:  
Une petite machine frigorifique prend en charge la production de chaleur. En outre, elle décharge la grande machine lorsque la demande de froid est faible.



### 7.3 Accumulateur thermique à court terme (jour-nuit)

Le guide «SICC 2002-1F Accumulateurs de chaleur à eau» fournit une très bonne base pour la conception détaillée du stockage dans l'eau; il est recommandé de le consulter.

Un accumulateur doit avoir un volume d'alimentation minimum de 40 litres par kW de puissance frigorifique, tant du côté du froid que chaud. Et l'accumulateur de chaleur doit avoir un volume au moins 1,5 fois supérieur à celui du froid. Lorsque l'accumulateur de chaleur doit être utilisé pour décaler la consommation d'énergie du jour vers la nuit, il doit être aussi grand que possible.

#### Utiliser le bâtiment comme accumulateur de masse

Le stockage d'énergie utilisant de l'eau avec un faible écart de température – comme c'est le cas dans le processus frigorifique – nécessite de grandes capacités de stockage. Lorsque des quantités importantes d'énergie doivent être stockées, le bâtiment peut servir d'accumulateur de masse. Dans ce cas, la température de départ des systèmes de dégagement de chaleur sans régulation de volume (p. ex. les TABS, les chauffages par le sol autorégulants) est un peu plus élevée pendant la journée. Pendant les

heures nocturnes, le bâtiment se refroidit à nouveau naturellement.

Ce procédé nécessite des composants thermoactifs (TABS ou chauffages par le sol autorégulateurs). Ceux-ci refroidissent ou chauffent une grande masse (plafond en béton). Cette grande masse a un effet d'amortissement et permet un dégagement de chaleur temporisé. Cet effet est particulièrement important à l'entre-saison – chauffage le matin, refroidissement l'après-midi. Ce décalage nécessite également un système de gestion du bâtiment qui règle les températures en conséquence.

#### Bilan journalier

Pour les machines frigorifiques fonctionnant toute l'année, on établit un bilan journalier. Cela permet de comparer le besoin de chaleur et la demande de refroidissement tout au long de la journée. À partir de là, on peut voir les puissances horaires et les énergies. Le résultat est une représentation graphique du besoin de chauffage et de refroidissement.

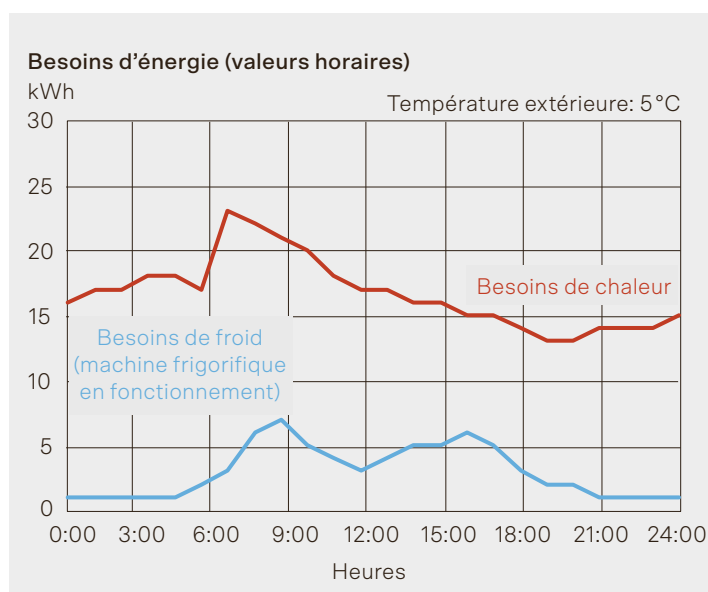
Cette simple observation statique doit être faite pour les deux états de fonctionnement (besoin de chauffage et de refroidissement) à trois températures extérieures différentes (12, 22 et 32 °C).

#### Comportement en charge partielle

Un profil de charge partielle peut être établi sur la base des heures pendant lesquelles la machine frigorifique n'est pas exploitée à 100%. Lorsqu'une machine frigorifique à deux niveaux de puissance (50 ou 100%) est exploitée, les heures de mise en marche et d'arrêt de la machine sont connues.

Cette observation montre que pour une production et un rendement énergétique optimaux, les machines frigorifiques devraient idéalement être équipées d'une régulation continue de la puissance de 20 à 100%.

Illustration 7.12: Valeurs horaires du fonctionnement du chauffage et du refroidissement d'un bâtiment et d'une machine frigorifique au cours de la journée.



## 7.4 Stockage saisonnier de la chaleur

Le sol est le meilleur endroit pour stocker de grandes quantités d'énergie thermique, notamment durant les périodes d'entre-saison. Non seulement la chaleur peut être extraite du sol, mais elle peut aussi être exploitée directement pour le refroidissement. En outre, l'énergie thermique excédentaire de l'été peut être stockée temporairement, puis prélevée en hiver. Un autre avantage est que cette unité de stockage ne nécessite pas d'espace (coûteux) dans le bâtiment.

### La régénération du sol est nécessaire

Le sol est exploité à l'aide de sondes géothermiques. Lorsqu'on lui ajoute de la chaleur, on parle de régénération du sol. Cela permet de doubler le rendement, car l'extraction de chaleur pour le fonctionnement des pompes à chaleur commence à une température de sortie plus élevée. En plus d'une exploitation tout au long de l'année, l'accumulateur à refroidissement par sondes géothermiques présente un avantage pour le fonctionnement du chauffage. L'accent est mis sur la réduction des coûts d'exploitation, car avec le refroidissement par sondes géothermiques, la machine frigorifique peut fournir l'«énergie frigorifique» en fonctionnant moins longtemps. L'efficacité est encore augmentée grâce à un meilleur COP (coefficient

de performance) de la machine et de la pompe à chaleur.

Grâce à la régénération, il est possible d'installer des sondes géothermiques plus petites (resp. leurs champs). Une simulation de l'exploitation sur 50 ans doit prouver que la température moyenne du sol ne descend pas en dessous de  $-1,5^{\circ}\text{C}$  pendant l'extraction et l'apport de chaleur (voir SIA 384/6).

Il convient de noter que les sondes géothermiques ne peuvent pas fonctionner avec n'importe quelles températures d'entrée. Pour le mode refroidissement, il faut respecter les exigences de température des cantons, de la commune et les spécifications du fournisseur des sondes géothermiques relatives aux propriétés des matériaux.

Afin de protéger les sondes géothermiques et d'éviter le dessèchement du sol, il convient de les faire fonctionner à  $40^{\circ}\text{C}$  maximum. L'autorisation d'exploitation du sol peut stipuler une température d'entrée inférieure. Cela dépend de l'occurrence respective des eaux souterraines.

### Régénération du sol lors de températures élevées

Les températures nettement supérieures à  $12^{\circ}\text{C}$  sont propices à la régénération (l'énergie est libérée dans le sol). La différence avec un accumulateur classique est que la chaleur est extraite à un niveau de température nettement

Illustration 7.13:  
Mode hiver. 70 unités d'énergie sont extraites du sol, 10 proviennent du refroidissement des bâtiments. Avec la machine frigorifique-thermique, 100 unités d'énergie de chauffage sont ainsi engendrées.

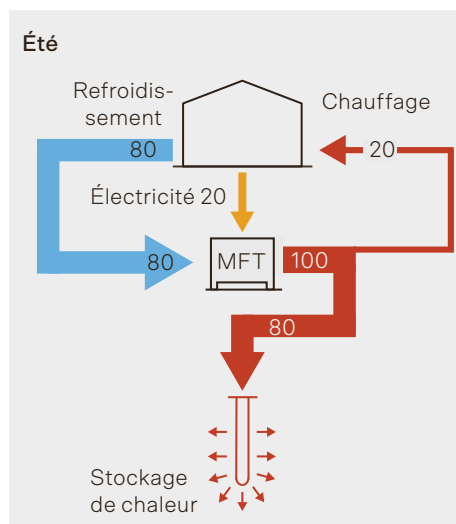
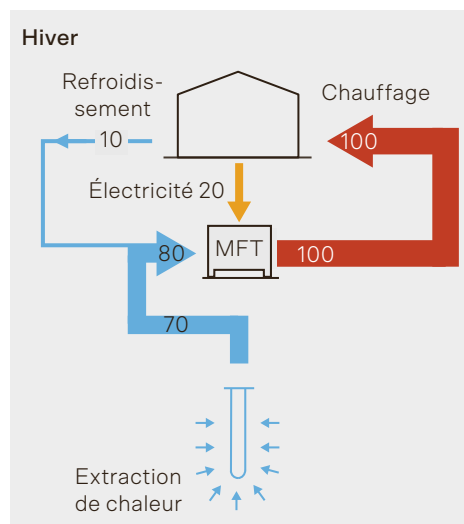


Illustration 7.14:  
Mode été. 80 unités d'énergie sont extraites du bâtiment (refroidissement du bâtiment). À partir de la machine frigorifique-thermique, 80 unités de chaleur sont stockées dans le sol et 20 unités sont nécessaires pour le chauffage et l'eau chaude.

inférieur à celui du stockage initial. Lorsque la chaleur est stockée à 25 °C, la température de retour sera toujours d’environ 15 °C. Cela signifie que l’énergie de l’accumulateur terrestre ne peut être utilisée directement pour le chauffage. Une pompe à chaleur est alors nécessaire pour cela.

## 7.5 Évacuation directe de la chaleur

Les systèmes évacuant les charges thermiques directement et sans machine frigorifique sont groupés sous le terme de «free-cooling».

- **Free-cooling:** Refroidir avec l’air neuf
- **Géo-cooling:** Refroidissement en utilisant le sol, p. ex. avec des sondes géothermiques ou les eaux souterraines.
- **Aqua-cooling:** Refroidissement avec de l’eau de surface naturelle comme l’eau d’un lac ou d’une rivière

### Free-cooling

Le free-cooling avec l’air neuf peut contribuer au refroidissement de la pièce pendant les heures les plus fraîches de la nuit (températures inférieures à 18 °C généralement entre 24h00 et 6h00). Une distinction est faite entre les systèmes suivants:

- Refroidissement par les fenêtres (fenêtres ouvertes)
- Ventilation mécanique (l’air froid est insufflé l’installation de ventilation)
- Refroidissement par l’eau froide sans machine frigorifique (l’eau de refroidissement est refroidie dans l’aéroréfrigérant et alimente directement – sans machine frigorifique – les pièces).

En été, le bâtiment doit toujours être refroidi naturellement la nuit, c’est-à-dire avec le free-cooling. Le refroidissement nocturne ne peut toutefois pas évacuer la totalité de l’apport de chaleur de la journée dans le court laps de temps à disposition. Pendant les heures de nuit, l’inertie de la masse, associée aux faibles différences de température entre l’intérieur et l’extérieur, agit «trop lentement»,

de sorte que le pré-refroidissement de jour ne pourrait être obtenu qu’avec de grands débits d’air et de l’«air froid». En outre, il y a toujours des nuits tropicales avec des températures extérieures supérieures à 20 °C, pouvant perdurer plusieurs jours ou semaines, comme lors des étés 2003, 2015 et 2018.

Les meilleures intégrations du free-cooling sont des consommateurs avec des températures élevées de l’eau de refroidissement de plus de 18 °C et une intégration directe du free-cooling.

Chaque installation de ventilation permet le «free-cooling» pendant la saison froide, lorsque les températures extérieures sont inférieures à 18 °C, car de l’«air neuf frais» peut toujours être soufflé dans les pièces. Cependant, le free-cooling a aussi des limites (économiques). Selon une étude réalisée en 2018 par la Haute école spécialisée des sciences appliquées de Zurich (ZHAW)<sup>1</sup>, le free-cooling par l’air n’a de sens et n’est économique que pour des températures de départ des consommateurs supérieures à 18 °C ou pour des charges thermiques très élevées tout au long de l’année, comme les salles de serveurs (voir également Chap. 8.8).

<sup>1</sup> «Free Cooling – Les solutions ingénieuses ont besoin de jugeote», 2018

## 7.6 Post-refroidissement: évacuation indirecte de la chaleur

### Valeur de dimensionnement et lieu d'installation

Lorsque la chaleur de la machine frigorifique ne peut être exploitée, elle doit être évacuée. Lorsque la chaleur est évacuée dans l'air extérieur, on parle de «post-refroidissement».

Le sous-refroidissement est dimensionné conformément aux données climatiques de la norme SIA 2028. Les aéroréfrigérants du Plateau suisse sont généralement dimensionnés pour une température extérieure de 32,6 °C (correspondant à Zurich-Kloten). À cette température, l'aéroréfrigérant sec doit fournir la puissance garantie par le fabricant.

**Important:** La température de dimensionnement n'est pas la température maximale qui se produit, mais celle à laquelle la puissance frigorifique doit être garantie.

Les aéroréfrigérants ne sont donc pas dimensionnés pour des pics de température ne se produisant que quelques heures par an. En outre, ce n'est pas la température extérieure qui est déterminante pour l'aéroréfrigérant, mais la température effective de l'air d'aspiration. Cela dépend de l'emplacement de l'installation de l'aéroréfrigérant. En effet, différents facteurs peuvent augmenter la température ambiante:

- Rayonnement solaire direct
- Surfaces sombres dans les environs (sol, murs)

- Accumulation de chaleur dans des niches protégées du vent

La recirculation indésirable de l'air ou les courts-circuits d'air («points chauds») dans l'aéroréfrigérant sont également problématiques. Dans ce cas, l'air chaud soufflé vers l'extérieur n'est pas évacué, mais à nouveau aspiré. Cela entraîne d'importantes pertes de puissance car la température de l'air d'aspiration est trop élevée.

Les recirculations ne sont souvent détectées que lorsque l'installation frigorifique ne fonctionne plus en été parce que les températures de sous-refroidissement sont trop élevées, même lorsque la température extérieure est «fraîche».

### L'été caniculaire 2003 a révélé des déficits

Au cours de l'été 2003, les températures extérieures avaient atteint plus de 35 °C pendant plusieurs semaines, voire plus de 40 °C dans certains cas. À cette occasion, il était apparu que les planificateurs avaient accordé trop peu d'attention aux influences de l'emplacement de nombreux aéroréfrigérants. En raison de choix maladroits, des températures d'aspiration avaient même atteint 50 °C.



Illustration 7.16:  
Aéroréfrigérants hybrides. (Source: Jaeggi Hybrid-technologie AG)



Illustration 7.17:  
Aéroréfrigérants hybrides. (Source: Jaeggi Hybrid-technologie AG)

Illustration 7.15:  
Aéroréfrigérant sec  
sur la toiture.  
(Source: CTA)



Comme la température de condensation de nombreuses machines frigorifiques est limitée à un maximum de 45 à 50 °C, elles avaient été déclenchées automatiquement.

L'arrêt de ces installations de climatisation avait alors provoqué une «défaillance totale» du refroidissement du bâtiment. C'est une preuve notable qu'une température d'aspiration trop élevée peut non seulement réduire la puissance de l'installation frigorifique, mais aussi la mettre hors service.

### Types d'aéroréfrigérants

Les aéroréfrigérants sont répartis en modèles «secs», «humides» (par évaporation) et en combinaison de ces deux modèles, les aéroréfrigérants dits hybrides. Les conceptions détaillées des différents aéroréfrigérants se trouvent dans la directive «SICC 2003-3 Post-refroidissement (aérorefroidisseurs)».

#### Aéroréfrigérant sec

Dans l'aéroréfrigérant sec, la chaleur est évacuée directement dans l'environnement par des ventilateurs et des échangeurs de chaleur. Le processus de refroidissement ne nécessite pas d'eau et la température de sortie dépend de la température d'aspiration.

Plus l'air circule rapidement dans l'aéroréfrigérant sec, plus il est bruyant. Lorsque le bruit dépasse les limites admissibles, la surface de refroidissement doit être agrandie ce qui réduit le débit et la vitesse de l'air et donc le niveau de bruit.

L'aéroréfrigérant sec a un haut niveau de fiabilité opérationnelle car il fonctionne uniquement avec des ventilateurs. Il est également très rentable en termes de maintenance et d'entretien.

Pour la nuit, il doit disposer du «mode silencieux» permettant de faire fonctionner l'appareil avec des vitesses de ventilation plus faibles.

#### Aéroréfrigérant par évaporation (tour de refroidissement humide)

Les aéroréfrigérants par évaporation sont également appelés «tours de refroidisse-

ment humides». Dans le modèle «ouvert», l'eau de refroidissement provenant de la machine frigorifique est injectée directement dans le flux d'air de l'aéroréfrigérant. Le résultat est un mélange air-eau (humidification). D'une part, le mélange est refroidi par le flux d'air. D'autre part, l'humidification par eau permet un refroidissement adiabatique, dans lequel une partie de l'eau s'évapore. L'énergie thermique de l'eau est ainsi extraite et l'air humidifié peut être refroidi en dessous de la température ambiante. Simultanément, l'air sortant de l'aéroréfrigérant par évaporation est humidifié à 100 % (saturé), et l'eau lave les particules de saleté présentes dans l'air («lavage de l'air»). Il ne reste alors plus que l'eau polluée.

#### Puissance de sous-refroidissement

La puissance de sous-refroidissement d'un aéroréfrigérant par évaporation dépend donc de la température d'aspiration et de l'humidité relative de l'air extérieur. En cas d'humidité de l'air élevée, la puissance diminue et la température de refroidissement augmente. Sous nos latitudes, ce n'est le cas qu'avant un orage.

#### Très efficace

Les aéroréfrigérants à évaporation ouverts ont une performance élevée. Les températures de refroidissement sont inférieures de plusieurs degrés Kelvin à celles d'un aéroréfrigérant sec et fonctionnent de manière fiable même à des températures très élevées. Ils sont donc très efficaces. En outre, ils ont une compacité jusqu'à dix fois supérieure à celle des modèles secs et sont donc peu encombrants.

#### Coûteux et complexe

Une grande quantité d'eau est nécessaire pour l'évaporation, ce qui se traduit par les nuages de vapeur dans les tours de refroidissement des centrales nucléaires. Pour maintenir les coûts de traitement de l'eau à un faible niveau, les aéroréfrigérants par évaporation utilisent de l'eau en circulation – et l'eau qui ne s'évapore pas est réinjectée dans le circuit.

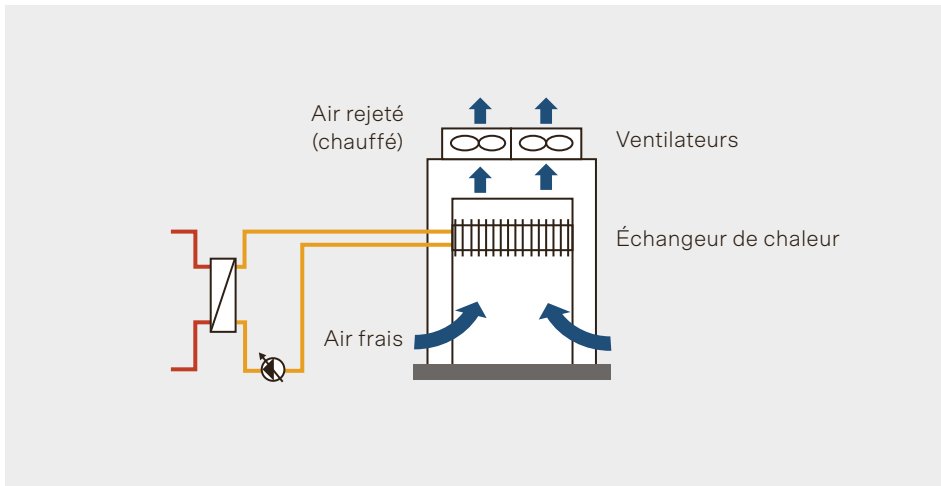


Illustration 7.18:  
Aéroréfrigérant sec.

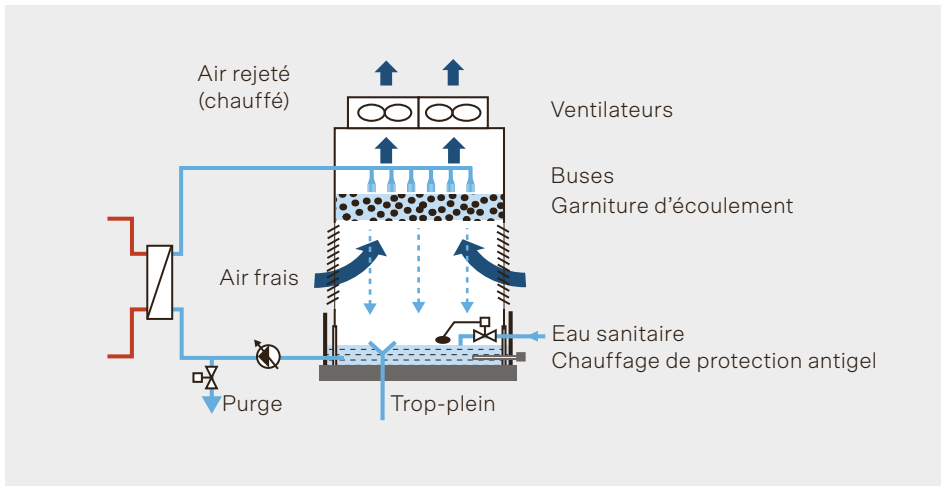


Illustration 7.19:  
Aéroréfrigérant par évaporation ouvert avec garniture d'écoulement.

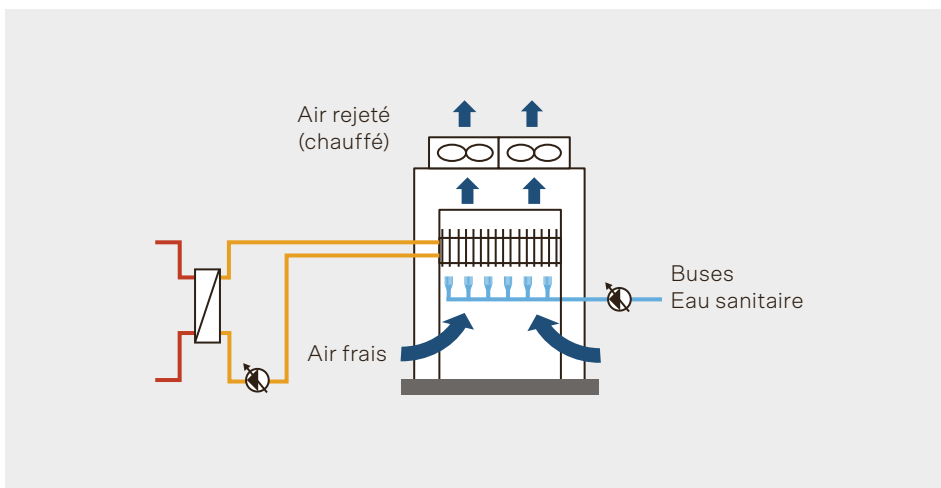


Illustration 7.20:  
Aéroréfrigérant par évaporation fermé avec pulvérisation d'eau par le bas.

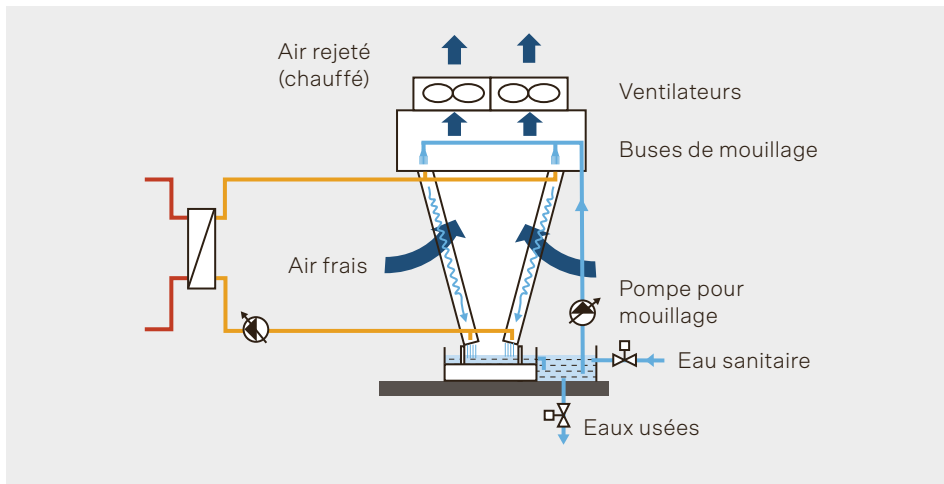


Illustration 7.21: Aéroréfrigérant hybride avec échangeurs de chaleur mouillés.

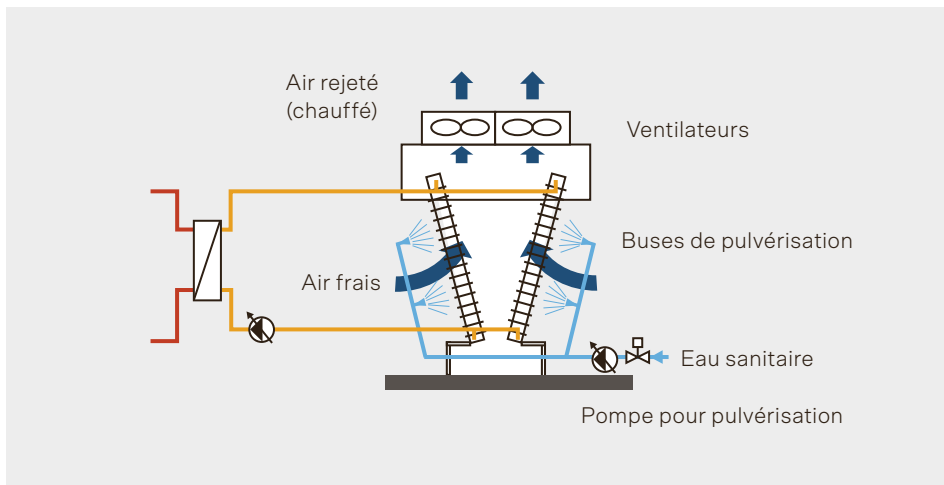


Illustration 7.22: Aéroréfrigérant hybride avec échangeurs de chaleur pulvérisés.

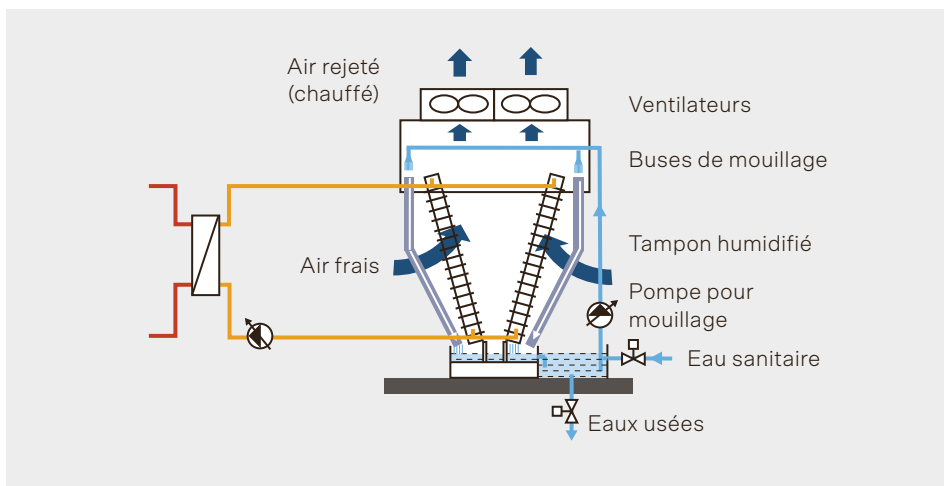


Illustration 7.23: Aéroréfrigérant hybride avec tampon humidifié (adiabatique).

Les illustrations 7.17 à 7.23 ont été réalisées à partir de photos de l'aéroréfrigérant de la directive SICC et de photos de Jäggi Hybridtechnologie AG.



### Si possible sans eau en hiver

De préférence, un aéroréfrigérant par évaporation ne devrait pas être utilisé en hiver. L'eau crée des nuages de brume pouvant donner lieu à des plaintes. En outre, lorsque les températures extérieures sont inférieures à 1°C, l'eau du bac de récupération doit être chauffée (électriquement!) pour éviter qu'elle ne gèle.

### Traitement de l'eau coûteux

L'aéroréfrigérant par évaporation nécessite beaucoup d'eau traitée à grands frais, ce qui renchérit les coûts d'exploitation.

Il convient de noter que l'humidité et les températures sont élevées autour de ces aéroréfrigérants. Cela peut entraîner des dommages dus à la corrosion sur les éléments en acier situés à proximité immédiate.

### Des exigences élevées en matière d'hygiène

Les aéroréfrigérants par évaporation sont des sortes de «grands laveurs d'air» qui éliminent une grande quantité de particules (poussières, pollens, germes, bactéries, spores etc.). Cette matière s'accumule ensuite dans le bac de récupération. Elle doit donc être régulièrement lavée, ce qui entraîne une multiplication environ par trois de la consommation d'eau.

Lorsque la maintenance est insuffisante, l'eau de recirculation se transforme en un liquide problématique sur le plan de l'hygiène. Les germes ou les bactéries (légiionelles), les spores s'accumulent et peuvent entraîner des risques sanitaires considérables (voir Encadré).

#### Foyer de légionellose à Warstein

À la fin de l'été 2013, 165 personnes à Warstein (Allemagne) sont tombées malades de la légionellose. Les légionelles provenaient probablement d'une installation de post-refroidissement d'une entreprise industrielle.

### Une maintenance régulière est essentielle

L'exploitation, la maintenance et l'entretien des aéroréfrigérants par évaporation (en particulier ceux à recirculation d'eau) sont complexes et coûteux.

En particulier avec l'eau de recirculation, des mesures organisationnelles et techniques doivent être prises en compte:

- Pas de stagnation
- Surveillance de la qualité de l'eau (chimique et microbiologique)
- Nettoyage périodique (respecter la santé et la sécurité au travail)

### Aéroréfrigérants hybrides

Les aéroréfrigérants hybrides sont des aéroréfrigérants secs qui sont en outre mouillés, humidifiés ou aspergés d'eau à des températures ambiantes plus élevées. L'eau évaporée refroidit l'air et les surfaces. Pour des raisons d'hygiène, l'eau résiduelle doit être rejetée directement dans les eaux usées. L'hygiène doit être respectée dans les systèmes avec recirculation d'eau. Pour éviter les dépôts sur les échangeurs de chaleur, il faut utiliser de l'eau adoucie; ce n'est pas nécessaire pour les aéroréfrigérants avec tampons humidifiés.

### Un peu moins efficient ...

L'effet de l'évaporation dans l'aéroréfrigérant hybride n'est pas aussi important que dans le modèle par évaporation; par conséquent, l'efficacité énergétique est également un peu plus faible, puisque la même température basse de post-refroidissement n'est pas atteinte.

Avec l'aéroréfrigérant hybride, le fonctionnement optimal en termes d'énergie et d'économie est généralement atteint lorsqu'il est utilisé comme un aéroréfrigérant sec jusqu'à une température extérieure comprise entre 20 et 25°C (selon la situation individuelle) et que l'«humidification» n'est activée qu'au-dessus de cette température.

**... mais plus facile d'entretien**

Les aéroréfrigérants combinés réunissent les avantages du refroidissement sec et par évaporation sans les inconvénients des tours de refroidissement par évaporation. L'utilisation d'eau douce permet de répondre aux exigences d'hygiène. Grâce aux échangeurs de chaleur fermés, il n'y a pas non plus de contamination du médium frigo-

porteur. Le principal avantage par rapport à l'aéroréfrigérant par évaporation est le coût d'exploitation beaucoup plus faible, car le modèle hybride fonctionne en grande partie à sec et nécessite donc beaucoup moins d'eau.

**Important:** Le système d'eau doit être planifié et mis en œuvre par un spécialiste.

Illustration 7.24: Les différents aéroréfrigérants avec les paramètres les plus importants et les avantages et inconvénients des systèmes.

Aperçu des aéroréfrigérants			
Type	Aéroréfrigérant sec	Aéroréfrigérant hybride	Aéroréfrigérant par évaporation
<b>Puissance de refroidissement</b>	10 (à 30) kW/m <sup>2</sup>	10 (à 30) kW/m <sup>2</sup>	env. 300 kW/m <sup>2</sup>
<b>Température</b>	5 à 9 K supérieure à la température d'aspiration	3 à 5 K inférieure à la température d'aspiration	3 à 5 K inférieure à la température d'aspiration
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts d'exploitation faibles</li> <li>- Coûts de maintenance et d'entretien faibles</li> <li>- Pas de nuages de vapeur d'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les pics de puissances et les températures réduites</li> <li>- Pas de nuages de vapeur d'eau</li> <li>- Puissance de refroidissement supérieure à celle des aéroréfrigérants secs</li> <li>- Adiabatique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encombrement réduit</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encombrement important</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encombrement</li> <li>- Traitement de l'eau nécessaire selon le type</li> <li>- Coûts d'exploitation moyens</li> <li>- Coûts de maintenance et d'entretien moyens</li> <li>- Nécessité d'un raccordement à l'eau</li> <li>- Nettoyage des nattes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traitement de l'eau nécessaire</li> <li>- Coûts d'exploitation très élevés</li> <li>- Coûts de maintenance et d'entretien importants</li> <li>- Critique sur le plan de l'hygiène</li> <li>- «Protection hivernale»</li> <li>- Humidité ambiante élevée et corrosion</li> </ul>

### Utilisation du système de ventilation pour évacuer la chaleur

(pour les bâtiments dont les systèmes de ventilation transportent plus de 10 000 m<sup>3</sup>/h).

Dans les bâtiments dotés de grands systèmes de ventilation, la chaleur de la machine frigorifique peut également être libérée dans l'air évacué, ce qui est possible grâce à la ventilation.

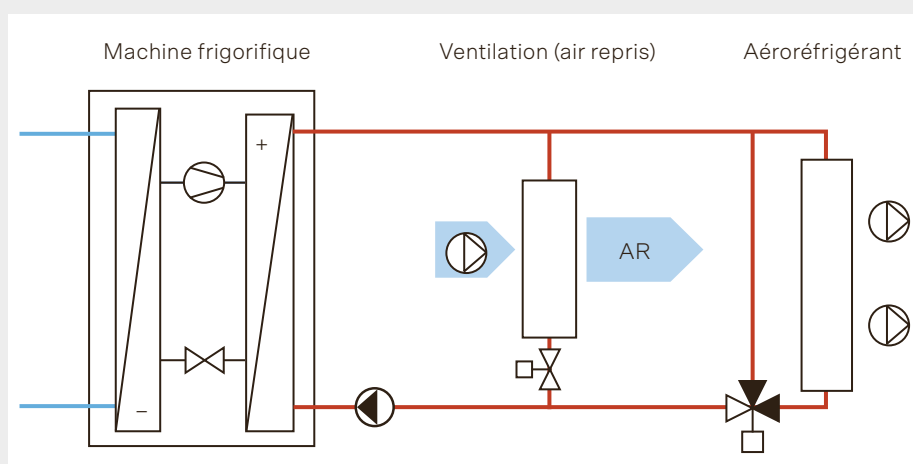
La chaleur est transférée à l'air évacué via un réseau caloporteur. Elle est transmise à l'air rejeté par un échangeur de chaleur (système de récupération de chaleur en circuit fermé KVS-RC).

### Avantages

- La chaleur peut être évacuée efficacement dans un espace réduit.
- Presque aucune énergie de transport supplémentaire n'est nécessaire.

### Exigences

- Pour que l'investissement soit rentable, le système de ventilation doit avoir un volume d'air d'au moins 10 000 m<sup>3</sup>/h.
- L'air évacué de l'installation de ventilation ne doit pas être plus chaud que 26 °C.
- L'installation de ventilation et le post-refroidissement doivent être situés à proximité l'un de l'autre. Sinon, la chaleur doit être évacuée par le réseau de chauffage existant.



## 10 points relatifs au dégagement de chaleur

1. La chaleur engendrée par la machine frigorifique doit être exploitée autant que possible.
2. Lorsque le besoin en chaleur est suffisamment important, une détérioration de l'efficacité du refroidissement par l'augmentation de la température de condensation peut encore améliorer l'efficacité globale du système (chauffage et refroidissement).
3. La commande de la machine frigorifique doit garantir que la température de condensation n'est augmentée que lorsque la chaleur peut être utilisée à un niveau de température plus élevé.
4. Dans les bâtiments ayant une faible consommation d'eau chaude sanitaire (p. ex. services ou commerces de détail), l'eau chaude sanitaire peut être préchauffée très efficacement à 40 ou 60 °C avec la chaleur du désurchauffeur de gaz chaud.
5. La chaleur peut être transférée de la journée à la nuit grâce à un accumulateur thermique.
6. En utilisant la masse du bâtiment comme volume de stockage (p. ex. avec les TABS), les besoins de chauffage le matin et de refroidissement l'après-midi peuvent être réduits, en particulier pendant l'entre-saison.
7. Le sol (sondes géothermiques) permet le stockage saisonnier de la chaleur. Il est important de veiller à ce que l'énergie stockée en été ne soit pas supérieure à l'énergie extraite en hiver.
8. Les aérorefrigérants secs ont de faibles coûts de maintenance et d'exploitation, mais nécessitent un espace d'installation plus important.
9. L'aérorefrigérant par évaporation seule est puissant et nécessite peu d'espace. En revanche, il est plus coûteux à entretenir et doit faire l'objet d'un contrôle d'hygiène (risque de légionellose).
10. Une attention particulière doit être accordée au bruit dû aux aérorefrigérants – surtout la nuit.



# Systemes hydrauliques

**Le système hydraulique relie les différents composants de la machine frigorifique-thermique à un système global et ce, avec les autres services techniques du bâtiment. Différents circuits ou branchements hydrauliques sont reliés entre eux de manière à ce que la chaleur soit transportée sans discontinuité du consommateur de froid au consommateur de chaleur. La conception correcte du système hydraulique est responsable en grande partie du fonctionnement efficace de l'ensemble du système.**

## 8.1 Généralités

Le système hydraulique permet de transporter le froid ou la chaleur à l'endroit où l'énergie (la chaleur) est absorbée ou restituée.

### Caractéristiques des installations frigorifiques et thermiques

Les circuits de chauffage se comportent de façon lente. Les fluctuations de température dans un système de chauffage classique entraînent rarement des dysfonctionnements. La différence entre la température de service et la valeur à la-

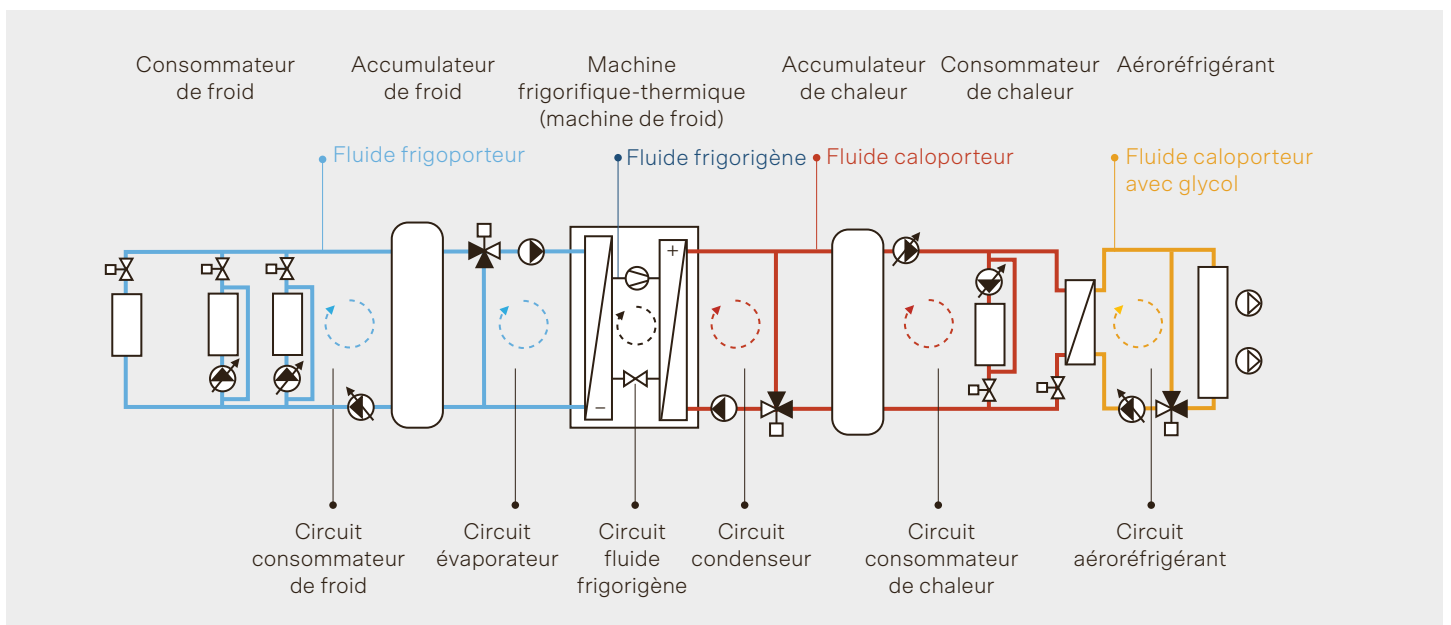
quelle le système est arrêté pour des raisons de sécurité est généralement assez importante, soit environ 10 K.

Ce n'est pas le cas pour les installations frigorifiques, où les températures sont proches, soit une différence d'environ 5 K. La température maximale du médium (qui est déterminée par la conception des échangeurs de chaleur) est limitée par le haut. En outre, les températures de service changent très rapidement dans le processus de refroidissement. Ils suivent la pression d'évaporation et de condensation.

C'est pourquoi il faut utiliser des vannes de régulation à course rapide. Cela permet d'éviter que la température de condensation ne soit trop élevée ou que la température d'évaporation ne soit trop basse (voir Chap. 9).

Les circuits hydrauliques des installations frigorifiques-thermiques consistent en l'interconnexion de nombreuses boucles partielles. Celles-ci doivent être soigneusement découplées hydrauliquement les uns des autres et simultanément connectées entre elles.

Illustration 8.1: Représentation simplifiée d'un branchement hydraulique avec les différents circuits.



## 8.2 Éléments du système hydraulique

Le système hydraulique comprend les éléments suivants:

- Pompes
- Vannes
  - Organes de régulation (vannes d'étranglement, vannes à trois voies)
  - Organes de contrôle (vannes de réglage)
  - Robinets de régulation
- Réseau de conduites
- Accumulateur
- Machine frigorifique, machine frigorifique-thermique
- Consommateurs de froid (batterie d'échange pour l'air, plafonds rafraîchissants etc.)
- Consommateurs de chaleur (chauffage des locaux, aëroréfrigérants etc.)

### Pompes

Dans la plupart des cas, les pompes centrifuges sont installées dans les sys-

tèmes hydrauliques des installations frigorifiques. Afin de maintenir l'efficacité énergétique des installations à un niveau aussi élevé que possible, on utilise aujourd'hui des pompes à vitesse de rotation régulée avec un convertisseur de fréquence. La puissance absorbée de la pompe est proportionnelle à la puissance au cube de la vitesse de rotation. Lorsque la vitesse de la pompe peut être réduite à 70 % (moins 30 %) en fonctionnement à charge partielle, sa consommation d'énergie chute à 34 % (moins 66 %), (voir Annexe 11.4 Approfondissement 2: Caractéristiques des pompes). Les économies effectives sont légèrement inférieures (environ 15 à 20 %) en raison du convertisseur de fréquence et des pertes de rendement de la pompe et du moteur électrique.

### Types de pompes

Selon l'application et la taille, différents types de pompes sont utilisés en technique de refroidissement (Illustr. 8.2).

Type de pompe	Débit volumique m <sup>3</sup> /h	Différence de pression bar	Raccord électrique V	Type de protection IP	Remarques
Circulateur à rotor noyé 	jusqu'à 50 m <sup>3</sup> /h	jusqu'à 1,2 bar	1 x 230 V	IP44	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour plus petites puissances</li> <li>- Hauteurs de refoulement plus petites</li> <li>- La chaleur du moteur est évacuée par le médium.</li> <li>- CF séparé</li> </ul>
Circulateur à rotor sec (pompe inline) 	jusqu'à 160 m <sup>3</sup> /h Exceptions: jusqu'à 300 m <sup>3</sup> /h	jusqu'à 2,5 bar	3 x 400 V	IP55	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour des puissances moyennes</li> <li>- Robuste</li> <li>- Env. 15% des rejets thermiques du moteur entrent dans la pièce.</li> <li>- Environ 85% des rejets thermiques du moteur entrent dans le fluide caloporteur et doivent être pris en compte.</li> <li>- Étanchéité des presse-étoupes</li> </ul>
Pompes normalisées sur socle 	dès 20 m <sup>3</sup> /h	jusqu'à 10 bar	3 x 400 V	IP55	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour des puissances plus grandes</li> <li>- Installation plus coûteuse</li> <li>- Env. 15% des rejets thermiques du moteur entrent dans la pièce.</li> <li>- Env. 85% des rejets thermiques du moteur vont dans le caloporteur et doivent être pris en compte.</li> <li>- Étanchéité des presse-étoupes</li> <li>- Applications spéciales</li> </ul>

Illustration 8.2:  
Les principaux types de pompes et leurs caractéristiques.

### Vannes de régulation

Les points suivants doivent être respectés pour les vannes du circuit frigoporteur – qu'il s'agisse de vannes de régulation ou d'étranglement:

- Si possible, les vannes du circuit de l'évaporateur sont situées du côté chaud. Elles sont ainsi moins sensibles aux dommages causés par la corrosion des condensats.
- Utiliser des entraînements à fermeture et à ouverture rapides. En règle générale, on utilise des entraînements avec un moteur électrique ou, dans des cas exceptionnels, des entraînements par solénoïdes ou pneumatiques.
- Les vannes de mélange ne doivent pas être utilisées comme vannes de séparation. Une installation incorrecte de la vanne peut entraîner des chocs et des vibrations sur l'obturateur de la vanne. Le démontage ultérieur de la vanne est coûteux. Il est essentiel de suivre les instructions d'installation du fabricant.
- Toutes les vannes à trois voies ne sont pas adaptées à une régulation continue. Il existe des modèles qui ne sont autorisés que pour une fonction de commutation pure.
- Pour les conduites de plus grandes dimensions, deux vannes de passage peuvent être utilisés à la place d'une vanne de mélange.

Par extension, ces points s'appliquent aussi au circuit caloporteur.

### Équilibrage hydraulique

L'équilibrage hydraulique, c'est-à-dire le réglage des débits dans le circuit de l'évaporateur et du condenseur, doit toujours être effectué. Il assure également le débit volumique défini pour la machine. Le contrôle du débit volumique avec les mesures correspondantes est effectué en même temps que la mise en service de la pompe (avant celle de la machine frigorifique) et est documenté en conséquence.

Lors de la mise en service, il est souvent difficile d'équilibrer correctement le système hydraulique. Cela s'explique par le fait que la totalité des charges frigorifiques ne se produit généralement pas à ce moment-là et que toutes les conduites ne sont pas «traversées par le fluide». Cependant, pour pouvoir effectuer des mesures en «plein débit», tous les consommateurs doivent être connectés et en service. Un contrôle hydraulique fiable de la production et de la consommation ne peut donc être effectué qu'en été à des températures extérieures supérieures à 25 °C (conditions de pleine charge).

Un contrôle hydraulique avec des mesures de débit volumique correspondantes est nécessaire:

- Régulateur avec limiteur de débit pour installations à débit volumique variable
- Vannes STA pour systèmes à débit volumique constant
- Compteur de chaleur
- Vannes avec orifices de mesure etc.

Les pompes utilisées aujourd'hui peuvent également mesurer et afficher le débit volumique. Cependant, lorsque cette mesure interne fournit des valeurs incorrectes, la pompe fonctionne également dans une mauvaise plage. Il est donc judicieux de vérifier les données de la pompe par une mesure indépendante (p.ex. avec un compteur de chaleur ou avec des dispositifs de mesure tels qu'une vanne STA).

Si les consommateurs sont alimentés par un débit volumique supérieur à celui qui est requis, la différence de température est plus faible, ce qui influence à son tour la température de retour et donc également la puissance de la machine frigorifique. Il est possible que la puissance nominale ne soit plus atteinte.



### 8.3 Intégration de la machine frigorifique

#### Intégration de machines frigorifiques sans limites de température

Dans le cas de la machine frigorifique, les températures d'entrée et de sortie du côté de l'évaporateur et du condenseur doivent se situer dans une certaine plage de températures. Par exemple, des températures d'entrée trop élevées dans le condenseur impliquent l'arrêt de la machine frigorifique par la haute pression. Ou bien la machine frigorifique ne peut pas démarrer car les températures de sortie de l'évaporateur sont trop basses. En outre, dans le cas du branchement hydraulique avec accumulateur, les températures de sortie du condenseur et de l'évaporateur doivent être réglées exactement sur le point de consigne afin que la température dans l'accumulateur ait une valeur constante.

Pour que la machine frigorifique puisse démarrer, il faut:

- un flux à travers le condenseur et
- un flux à travers l'évaporateur et
- le respect de certaines limites de température.

#### Exemple

Entrée de l'évaporateur: min. 8 °C  
max. 16 °C  
Entrée du condenseur: min. 25 °C  
max. 32 °C

car les conditions de libération ne sont pas remplies.

#### Intégration de machines frigorifiques avec limites de température

Un circuit de mélange permet de respecter les valeurs-limites de température admissibles tant du côté de l'évaporateur (température d'entrée maximale) que du côté du condenseur (température d'entrée minimale) et d'éviter les dysfonctionnements. Ces branchements hydrauliques sont donc à privilégier.

#### Débit constant et variable

Dans le passé, les circuits hydrauliques à débit constant étaient principalement utilisés dans les technologies de réfrigération. Dans ces systèmes, le générateur et les consommateurs (de froid) sont toujours traversés à plein débit. Une grande quantité d'eau est déplacée, ce qui entraîne inévitablement une forte consommation d'énergie par les pompes.

Aujourd'hui, le système hydraulique est construit de telle sorte qu'avec des générateurs de froid à régulation de puissance (20 à 100 %), des débits volumiques variables sont utilisés dans les circuits de l'évaporateur et du condenseur.

Illustration 8.3: Intégration d'une machine frigorifique sans régulation de la température d'entrée. Lorsque, par exemple, la température effective d'entrée de l'évaporateur est de 21°C et que le fabricant spécifie une température maximale de 16°C, la machine frigorifique ne peut pas démarrer

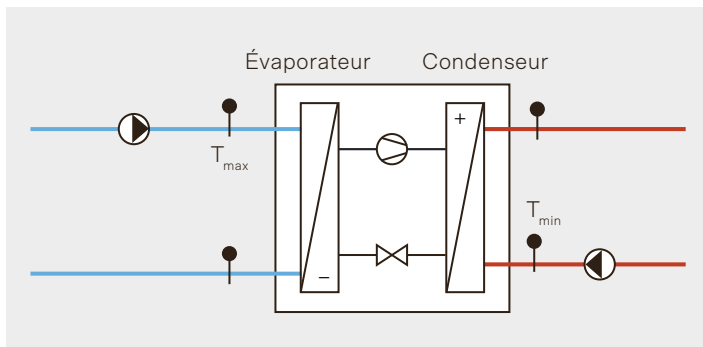
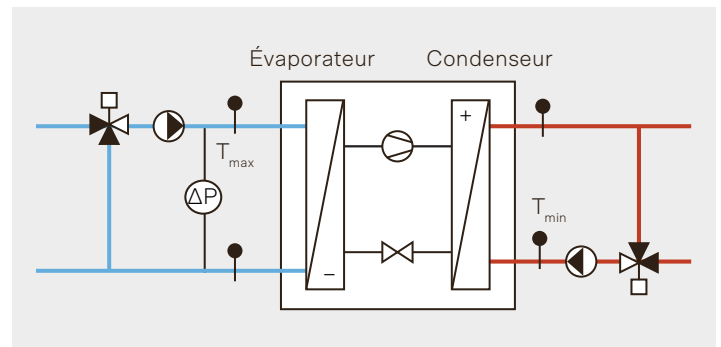


Illustration 8.4: Intégration d'une machine frigorifique avec limitation de la température. Le schéma montre un circuit avec un accumulateur et des vannes de régulation de débit pour limiter la température d'entrée de l'évaporateur.



### Points de contrôle pour l'intégration des machines frigorifiques

Les points suivants doivent être observés pour les machines frigorifiques (générateurs) destinés à l'eau glacée de climatisation:

- Plusieurs machines frigorifiques sont intégrées en parallèle pour obtenir un débit volumique plus important (avec le même niveau de température).
- Vérification de l'adéquation d'une machine frigorifique à régulation de puissance (20 – 100%).
- Les débits volumiques du condenseur et de l'évaporateur doivent être variables (pour autant que le fournisseur de la machine frigorifique le permette).
- Si possible, la régulation du condenseur et de l'évaporateur doit être prise en charge par l'unité de commande de la machine frigorifique. L'expérience a montré que la régulation par un système de niveau supérieur entraîne souvent des problèmes.
- Pour les systèmes dont la puissance frigorifique est supérieure à 200 kW, il convient de prévoir deux machines (ou plus) d'une puissance de 50 % chacune ou, si nécessaire, le concept de redondance «n+1». Cela augmente la sécurité opérationnelle et optimise le fonctionnement (efficacité énergétique). Mais les coûts d'investissement augmentent alors également.
- Les machines frigorifiques-thermiques (MFT) peuvent fonctionner à la fois en mode refroidissement et en mode chauffage. L'utilisation principale définit les variables de contrôle des températures du système. Par exemple, on peut éviter que la MFT fonctionne en permanence à une température de condensation de 50 °C en raison d'une demande de chaleur de seulement 10 %.

### Pompes à vitesse réglée comme alternative au circuit de mélange

L'installation de vannes de mélange pour la limitation de la température est onéreuse. En alternative, la température d'évaporation ou de condensation peut être limitée avec une pompe à vitesse réglée par le débit volumique. En réduisant le débit volumique, on augmente en même temps l'efficacité énergétique du système (voir également Chap. Régulation).

La question de savoir si une machine frigorifique peut fonctionner avec des débits variables doit être clarifiée avec le fournisseur de la machine concernée – son accord écrit est nécessaire.

### Remarques sur le système hydraulique du côté de l'évaporateur

Du côté de l'évaporateur, il faut s'assurer, sur le plan hydraulique et en termes de technologie de régulation, qu'il ne se produise pas d'états d'exploitation entraînant des dommages ou des dysfonctionnements.

- Les installations dotées d'un accumulateur (frigorifique) doivent être équipées d'une régulation de mélange afin que la température respecte toujours le point de consigne.
- Choisir les conduites les plus courtes possibles – moins de 10 mètres – dans le circuit de l'évaporateur.
- Le temps de course<sup>1</sup> de l'entraînement de la vanne ne doit pas dépasser 45 secondes.
- La surveillance du débit (contrôleur de débit) est indispensable dans le circuit de l'évaporateur; la mesure de la pression différentielle ou la surveillance du débit thermique sont plus précises qu'un contrôleur de débit à palettes<sup>2</sup> et sont donc préférables à celui-ci.
- Prévoir un fonctionnement ultérieur de la pompe de l'évaporateur (après coupure de la machine frigorifique).
- Le circuit de l'évaporateur doit absolument faire l'objet d'une surveillance de la température à titre de protection contre la surchauffe. Une limite de température maximale doit donc être prévue à l'entrée de l'évaporateur.

### Remarques sur l'hydraulique du côté du condenseur

Du côté du condenseur, il faut s'assurer que la température d'entrée de celui-ci n'est pas trop élevée en raison de la température de l'aéroréfrigérant ou de l'utilisation de la chaleur. Sinon, la pression augmentera, un dysfonctionnement de la haute pression se produira et l'ensemble de la machine frigorifique s'arrêtera. Les points suivants sont à respecter:

- Clarifier avec le fournisseur de la machine frigorifique quelle doit être la température minimale de l'eau à l'entrée du condenseur. Dans le cas d'une pompe à chaleur, la température d'entrée doit correspondre à la température de conception du système de chauffage. À un dimensionnement de p. ex. 29/35 °C, la température d'entrée dans le condenseur est de 29 °C à une charge de 100%. Lorsqu'une température de sortie constante est requise à charge réduite, la température d'entrée doit être augmentée par mélange en conséquence.
- Le temps de course de l'entraînement de la vanne ne doit pas dépasser 30 secondes. Le condenseur réagit de manière plus sensible aux changements de température que du côté évaporateur. Avec une commande de vanne lente, une augmentation rapide de la température de condensation peut provoquer un dysfonctionnement de haute pression. Il convient donc d'utiliser des entraînements plus rapides dans ce cas.
- Prévoir le fonctionnement ultérieur de la pompe du condenseur (après coupure de la machine frigorifique).

---

<sup>1</sup> Le temps de fonctionnement est le temps nécessaire à l'entraînement de la vanne pour déplacer la vanne de la position finale «OUVERTE» à la position finale «FERMÉE».

<sup>2</sup> Ce contrôleur de débit détecte le débit d'eau à l'aide d'une palette et s'allume ou s'éteint grâce à un microcontact.

## 8.4 Intégration des consommateurs de froid

Il doit être possible de régler individuellement la température des différents groupes de consommateurs de froid. Ce problème peut être résolu par un circuit d'étranglement (A), un circuit d'injection (B) ou un circuit de mélange (C) (voir Illustr. 8.5). Ces circuits permettent d'éviter les fluctuations des températures de départ de l'eau glacée.

Illustration 8.5:  
Circuits de base des consommateurs de froid et leurs caractéristiques. Dans chaque cas, le circuit est lié au réseau principal.

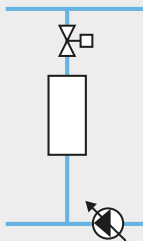
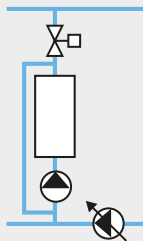
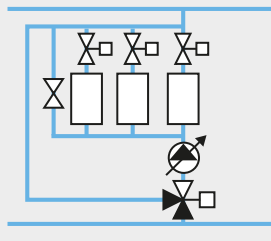
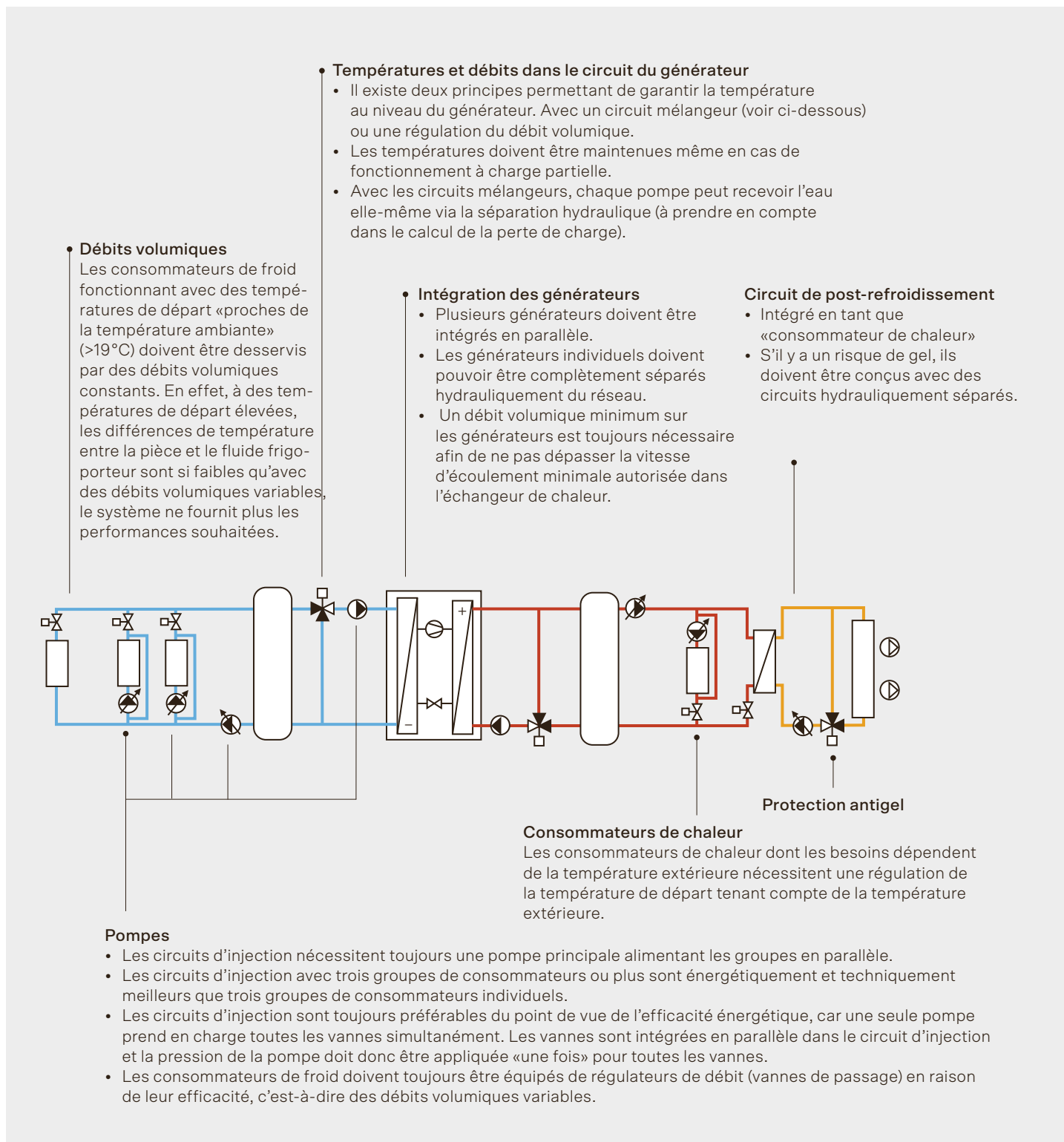
	A Circuit d'étranglement	B Circuit d'injection	C Circuit mélangeur
			
<b>Application typique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Installations de ventilation</li> <li>- Froid industriel</li> <li>- En cas de refroidissement latent et sensible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systèmes d'éléments de construction thermoactifs</li> <li>- Poutres et baffles de refroidissement</li> <li>- Plafonds rafraîchissants</li> <li>- Aéroréfrigérant à circulation d'air</li> <li>- Appareils d'allège</li> <li>- Empêche un refroidissement latent (formation de condensat)</li> <li>- La température de départ peut être</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Même application que B</li> <li>- Circuit supplémentaire p. ex. éléments de plafond rafraîchissant)</li> </ul>
<b>À prendre en compte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circuit permettant d'atteindre la température la plus basse possible (pour la déshumidification).</li> <li>- La température au niveau du consommateur de froid peut fluctuer</li> <li>- Veiller à la stratification dans le système de ventilation des aéroréfrigérants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circuit permettant d'atteindre la température requise avec la température la plus élevée du fluide frigoporteur.</li> <li>- Les températures peuvent être maintenues de façon précise.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les températures peuvent être maintenues de façon très précise.</li> </ul>

Illustration 8.6:  
Aperçu du système hydraulique d'une installation frigorifique de climatisation.



### Équipements et instruments nécessaires

Différentes tuyauteries et instruments doivent être installés dans les circuits de l'évaporateur et du condenseur pour assurer une mise en service correcte et une optimisation ultérieure ainsi que la maintenance.

Bien que, par exemple, la température de l'eau glacée ou la différence de pression puissent être relevées au niveau de la machine frigorifique, il est judicieux de

prévoir des instruments et des dispositifs de mesure supplémentaires dans les conduites d'alimentation. Le personnel d'exploitation peut ainsi détecter plus rapidement les éventuelles déviations.

L'illustration 8.7 montre les tuyauteries et instruments recommandés à l'exemple du côté du condenseur. Les éléments du côté de l'évaporateur sont identiques.

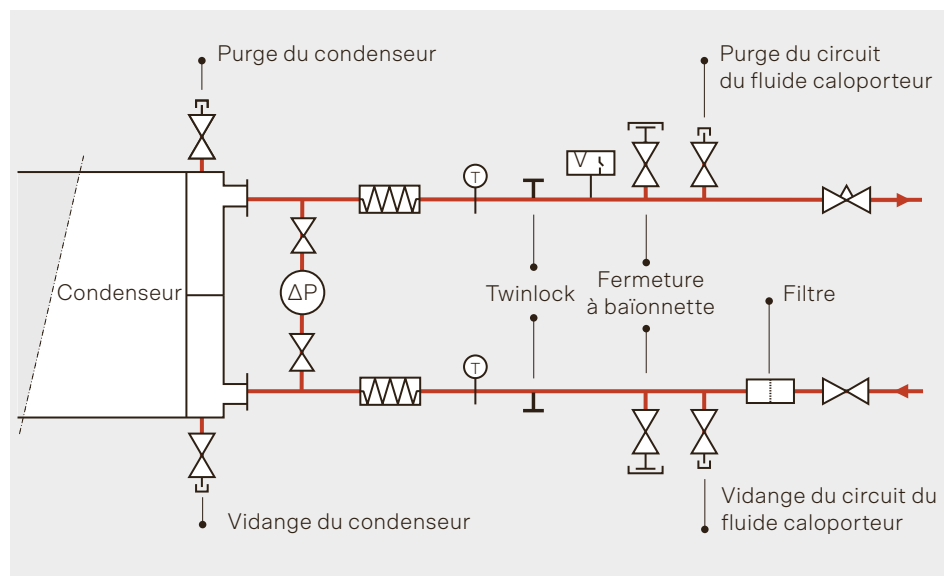


Illustration 8.7: Robinetterie et instruments à l'exemple du côté condenseur.

Symbole	Désignation	Explication
	Vanne d'arrêt	
	Vanne d'équilibrage et d'arrêt	Les vannes d'équilibrage et d'arrêt sont nécessaires pour l'équilibrage hydraulique.
	Amortisseur de vibrations	Les amortisseurs de vibrations sont installés pour réduire les vibrations de la machine vers le réseau de conduites.
	Filtre	Un filtre est nécessaire du côté de l'entrée après le verrouillage.
	Contrôleur de débit	Il faut installer un contrôleur de débit pour éviter que l'évaporateur ne gèle. Celui-ci peut également être intégré à la machine.
	Fermeture à baïonnette (accouplement Storz) (en option)	Pour les circuits ouverts (aéroréfrigérants par évaporation), il est recommandé de prévoir un verrouillage à baïonnette. Cela permet un nettoyage chimique aisé du condenseur dans le processus de circulation. Un obturateur supplémentaire doit être inséré avant la fermeture à baïonnette.
	Twinlock	Twinlock pour la mesure mobile de la température ou de la pression. Il est recommandé d'installer des points de mesure Twinlock aux endroits suivants: en amont et en aval des pompes et dans le retour du consommateur.
	Affichage de la pression différentielle	Affichage de la pression différentielle pour le contrôle du débit volumique
	Sonde de température (T)	Affichage de la température

Illustration 8.8: Equipements et instruments nécessaires d'une machine frigorifique intégrée.

### 8.5 Absorption de chaleur

Le concept du circuit hydraulique dans le circuit d'eau glacée dépend des facteurs suivants:

- Taille de l'installation (puissance)
- Nombre de consommateurs et de machines frigorifiques
- Exigences relatives aux températures admissibles (quelle peut être l'ampleur de l'écart par rapport à la température de consigne?)
- Sécurité d'approvisionnement

Les considérations structurelles les plus importantes dans la conception du système hydraulique sont les suivantes:

- Avec ou sans séparation hydraulique
- Avec ou sans accumulateur
- Avec débit variable ou constant

#### Séparation hydraulique

Les séparations peuvent être réalisées hydrauliquement (découplage) et techniquement (séparation du système). La séparation hydraulique garantit que les différentes pompes ne s'influencent pas mutuellement de manière active. Elle crée également un «point zéro hydraulique» entre les deux parties du réseau.

La séparation du système hydraulique peut être conçue avec un accumulateur ou avec une dérivation (tuyau de connexion entre le collecteur de départ et le collecteur de retour sans effet de stockage).

#### Dérivation comme découplage hydraulique

Les installations à découplage hydraulique simple (souvent appelé dérivation ou bypass) nécessitent peu d'espace, c'est-à-dire pas d'accumulateur, et sont donc intéressants en termes d'investissement. Le débit volumique dans le circuit de l'évaporateur doit être égal ou supérieur à celui du circuit extérieur. Ils présentent toutefois les inconvénients suivants:

- aucune influence sur la fréquence de commutation de la machine frigorifique (manque de volume de stockage).
- Usure élevée des compresseurs
- Manque de puissance frigorifique en raison d'une limitation de démarrage de la machine frigorifique
- Détérioration de l'efficacité énergétique

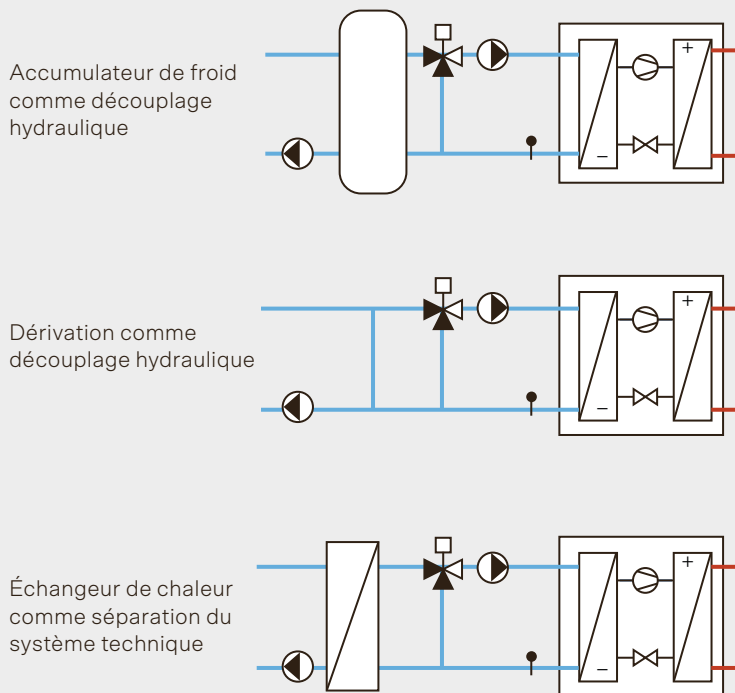


Illustration 8.9:  
Exemples de séparations hydrauliques et techniques.

- Pics de charge plus fréquents dans le réseau électrique
- Fluctuations de température dans le réseau frigorifique
- Contrainte élevée sur les vannes de régulation et les entraînements
- Durée de vie plus courte des entraînements

#### **Accumulateur de froid comme découplage hydraulique**

Pour les installations

- avec un petit volume de réseau
- pour les machines frigorifiques dont la plage de régulation est limitée et
- avec des exigences plus élevées en matière de régulation de la température

il est judicieux de prévoir un accumulateur. Cela permet, entre autres, de limiter la fréquence de commutation de la machine frigorifique.

L'accumulateur (technique ou d'énergie) assume les tâches suivantes

- Le découplage hydraulique entre le circuit du générateur de froid ou de chaleur et le système de distribution.
- Utilisation de l'accumulateur comme réserve de secours Mise à disposition de la puissance frigorifique par l'unité de stockage à faible charge et avec la machine frigorifique débranchée (p. ex. lors de la panne d'une machine).
- Stabilisation de la régulation de la puissance

L'état de la charge de l'accumulateur peut être utilisé pour réguler la puissance de la machine frigorifique et la séquence de priorité dans le cas de plusieurs générateurs.

#### **Séparation technique des systèmes**

Le système technique de séparation est une installation de différenciation avec un échangeur de chaleur. Il assure la séparation hydraulique (côté liquide) de deux systèmes de l'installation – p. ex. lors de l'intégration de l'aéroréfrigérant. Cela signifie que

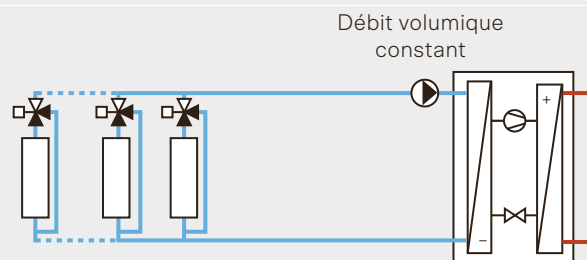
- différents médiums (eau-glycol)
- séparation en réseau des grands contenus (mot-clé: sécurité)
- séparations commerciales telles que le chauffage et la climatisation ou
- systèmes avec d'importantes différences statiques (p. ex. dans les tours) peuvent être reliés entre eux de manière économique (voir Chap. 8.7 Intégration du post-refroidissement).



## Vue d'ensemble des circuits d'eau glacée

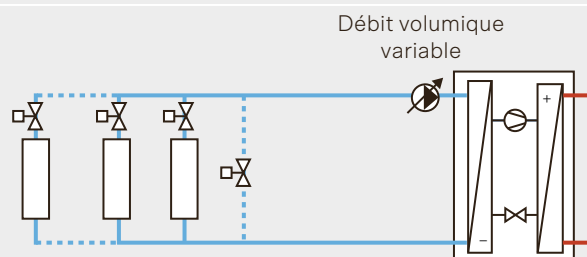
### 1. Système sans découplage hydraulique avec débit volumique constant

- Ce système était utilisé dans le passé, mais ne l'est plus aujourd'hui.
- L'inconvénient est le besoin élevé en énergie de la ou des pompes au cours de l'année, car le débit volumique reste constant. De plus, ce système génère une température de retour basse lorsqu'il n'y a pas de consommation.
- Comme la machine frigorifique fonctionne toujours à un niveau de température inférieur à celui requis, ce système est modérément efficace sur le plan énergétique.



### 2. Système sans découplage hydraulique avec débit volumique variable

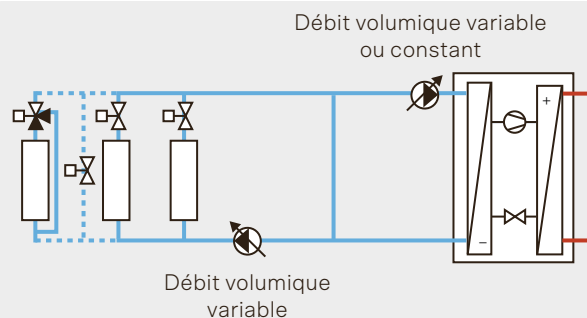
- Conception simple du système
- Avantageux
- Exigences plus élevées en matière de planification, car des débits minimaux doivent être garantis (sécurité).
- Les consommateurs de froid ne doivent pas avoir d'exigences élevées en matière de performance et de stabilité de la température.



### 3. Système avec découplage hydraulique sans accumulateur

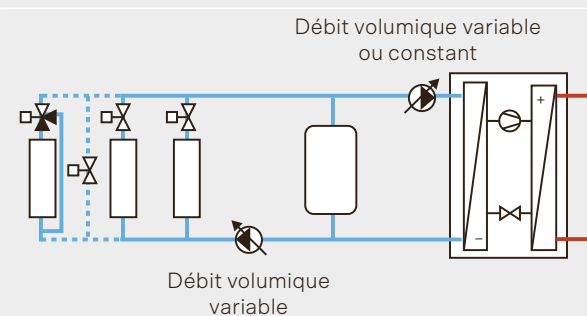
- Convient pour les applications sans charge de base élevée ( $\dot{Q}_{V \min.} > \dot{Q}_{E \min.}$ )\* Si ce n'est pas le cas, le système présente des températures fluctuantes et une fréquence de commutation élevée.
- Il faut veiller à ce que le débit volumique de la pompe de l'évaporateur soit supérieur d'environ 5% au débit volumique des générateurs.

- \*  $\dot{Q}_{V \min.}$  = charge minimale du consommateur (demande minimale de refroidissement)  
 $\dot{Q}_{E \min.}$  = charge minimale du générateur (demande minimale de refroidissement)



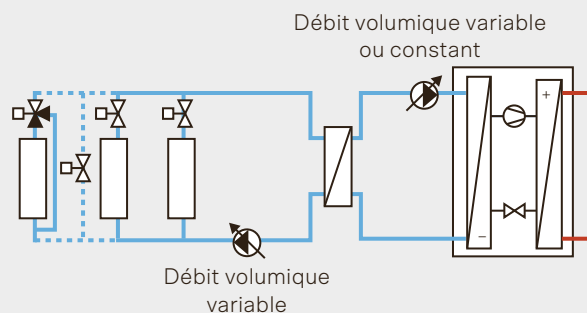
### 4. Système avec découplage hydraulique avec un accumulateur

- Ce système est utilisé lorsque les exigences en matière de stabilité du système et de sécurité de l'approvisionnement sont plus élevées (p. ex. avec deux générateurs connectés en parallèle).
- Encombrement plus grand
- Plus coûteux à installer
- La taille de l'accumulateur dépend des exigences du système (demande de pointe, nombre de mises en marche du compresseur par heure, précision de la température de l'eau glacée etc.).



### 5. Système avec une séparation de système (échangeur de chaleur)

- Pour les systèmes eau-glycol
- Pour de grandes différences de pression (immeuble-tour)



### Système à débit variable sans découplage hydraulique

Dans les systèmes à débit variable et sans découplage hydraulique, la puissance frigorifique est ajustée en faisant passer plus ou moins d'eau dans l'évaporateur. Le débit volumique est régulé par des vannes d'étranglement ou d'injection au niveau des consommateurs.

Comme les circuits producteur et consommateur s'influencent hydrauliquement dans ce système, l'évaporateur fonctionne avec des débits volumiques variables.

Dans le cas de plusieurs machines frigorifiques, une pompe à eau glacée à vitesse réglée est affectée à chaque machine; une pompe de réseau consommateur n'est pas nécessaire. Le fonctionnement en parallèle des pompes à vitesse réglée impose des exigences plus élevées au planificateur de l'installation et n'est donc pas recommandé pour les

systèmes comportant plus d'une machine frigorifique. L'illustration 8.10 en donne un exemple.

### Comportement du débit volumique et des températures

Les deux graphiques de l'illustration 8.11 montrent le comportement du débit volumique et des températures à différentes puissances de l'installation frigorifique.

Dans cet exemple, le débit à travers l'évaporateur peut être réduit de 18 litres par seconde à 10 litres (1). La puissance diminue alors de 100 à 55%. Dans cette plage, la différence de température à travers l'évaporateur reste constante à 6 K. Selon les spécifications du fournisseur, le débit volumique ne doit pas être inférieur à 11 litres par seconde. Lorsqu'on souhaite réduire davantage la sortie, il faut ouvrir le bypass. Par conséquent, seule une partie de l'eau glacée circule dans les consommateurs de froid (2). L'eau glacée «réchauffée» et l'eau glacée «non utilisée» de la dérivation se mélangent. En conséquence, la température d'entrée de l'évaporateur diminue et la différence de température dans l'évaporateur tombe à 3 K (point d'arrêt).

Illustration 8.10: Installation frigorifique avec débit volumique variable et dérivation.

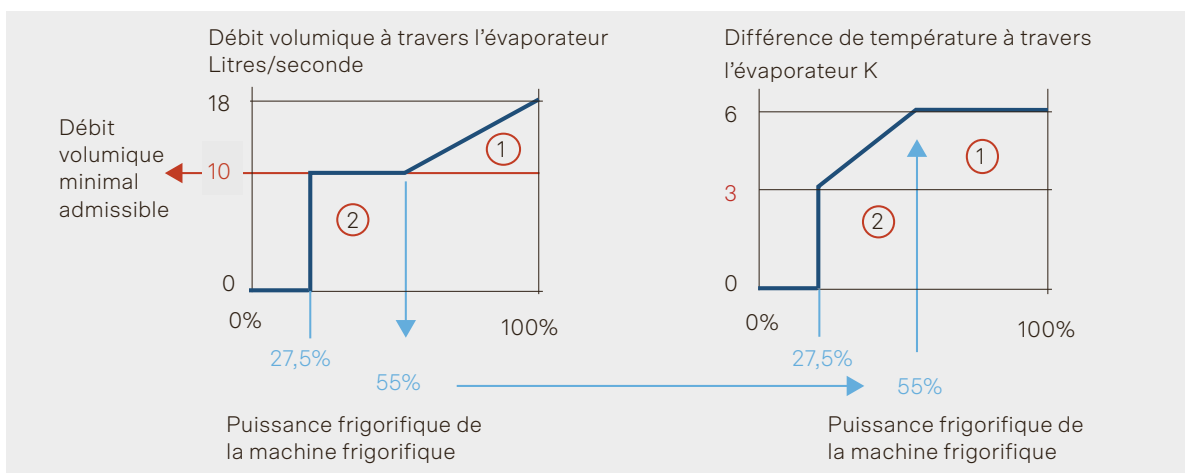
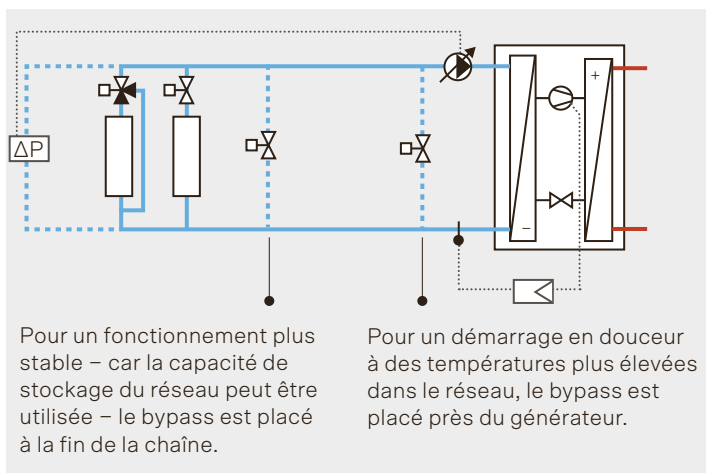


Illustration 8.11: Comportement du débit volumique et des températures à différentes puissances de l'installation frigorifique.

## 8.6 Accumulateur d'eau glacée

Les accumulateurs d'eau glacée amortissent les variations de température dans la production et chez les consommateurs. Ils contribuent à rendre l'ensemble du système «facile à exploiter». Ils réduisent ainsi la fréquence de commutation de la machine frigorifique et peuvent stocker l'énergie (p. ex. la décaler sur la journée).

Qu'un accumulateur soit utilisé comme accumulateur d'énergie ou comme accumulateur technique n'a aucune importance du point de vue de l'hydraulique.

### Accumulateur technique (accumulateur-tampon)

Les accumulateurs-tampon ont une capacité relativement faible. Ils agissent comme un élargissement du réseau hydraulique, ce qui permet de réduire la fréquence de commutation de la machine frigorifique. Elle doit être aussi faible que possible – p. ex., 3 commutations maximum par heure. Une machine frigorifique avec commutation marche-arrêt (0 ou 100 %) nécessite un accumulateur plus grand qu'une machine avec commutation par étages ou à régulation de puissance (20 – 100 %).

Pour une machine frigorifique avec une large plage de régulation (p. ex. machine équipée de CF avec une plage de puissance de 20 à 100 %, l'accumulateur peut être plus petit. Un petit accumulateur signifie toutefois que la puissance de la machine frigorifique doit être limitée à la demande de refroidissement actuelle des utilisations lors de son démarrage. Sinon, la machine frigorifique démarrera à 100 % de sa puissance, l'accumulateur sera chargé en peu de temps et la machine s'arrêtera à nouveau. En général, ces machines sont mises en marche à leur puissance minimale, puis montent lentement en puissance.

### Dimensionnement de l'accumulateur technique

Lors du dimensionnement de l'accumulateur, le mode de régulation de la machine frigorifique (EN/HORS ou en fonction de la demande avec un convertisseur de fréquence) fournit la première indication du volume nécessaire de l'accumulateur.

- Pour les installations frigorifiques à un seul étage (marche/arrêt), la fréquence de commutation maximale est de 50 % de la puissance des consommateurs. En dessous et au-dessus de cette valeur, la fréquence de commutation est réduite.
- Pour les machines frigorifiques à régulation de puissance, cette fréquence de commutation maximale est de 50 % de l'étage de puissance le plus faible.

Lorsque la fréquence de commutation est supérieure à, par exemple, 3 commutations par heure, le volume de l'accumulateur doit être plus important.

À titre indicatif, le volume de l'accumulateur peut être estimé entre 30 et 40 litres de contenu net par kW de puissance frigorifique (à 100 % de la puissance).

**À noter:** Seul le volume actif de l'accumulateur peut être pris en compte lors de son dimensionnement. Le volume des zones de mélange dans la partie supérieure et inférieure de l'accumulateur ne peut pas être utilisé pour le stockage d'énergie. Avec un accumulateur «svelte», le volume utilisable est plus grand, les zones de mélange par rapport au volume total sont plus petites.

### Accumulateur d'énergie

Les accumulateurs d'énergie sont des accumulateurs techniques capables d'absorber aussi complètement et de (stocker temporairement) la puissance d'une machine frigorifique pendant au moins une heure.

Une stratification thermique du médium, clairement définie, doit également être garantie dans l'accumulateur d'énergie,

celui-ci présentant l'avantage de pouvoir être utilisé comme réserve de sécurité pour écrêter les pics de puissance (sur 2 à 3 heures).

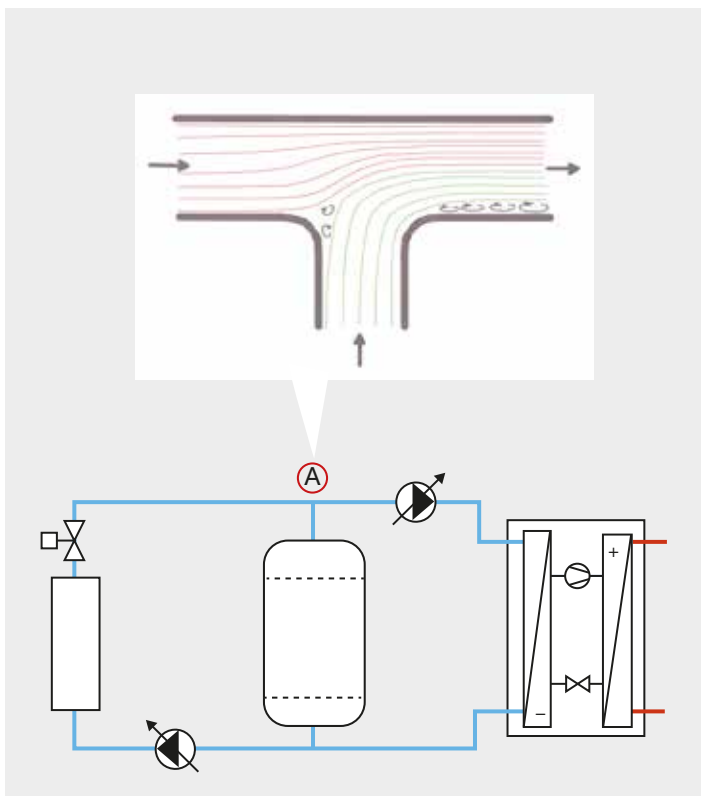
#### Intégration d'accumulateurs de froid

Contrairement aux accumulateurs thermiques en chauffage, dans les installations frigorifiques, l'eau glacée est introduite par la partie inférieure de l'accumulateur. L'eau «réchauffée» par les consommateurs est introduite par le haut.

Sans mesures particulières, une stratification de la température s'établit donc dans l'accumulateur. Ce n'est pas toujours le cas et cela dépend du rapport entre les deux débits volumiques (Illustr. 8.12).

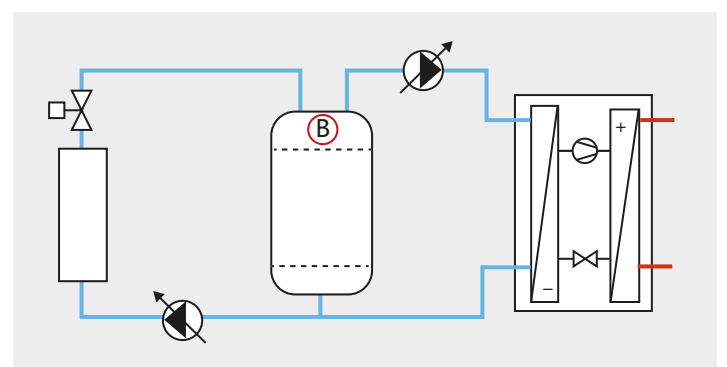
Lorsqu'une stratification de la température se produit dans la ligne de retour du circuit frigorifique (voir l'Illustr. 8.12 Point A), cela entraîne une fluctuation des températures à l'entrée de la machine frigorifique, ce qui peut alors provoquer une instabilité dans la régulation.

Illustration 8.12: Intégration hydraulique d'un accumulateur de froid. La section de détail montre comment les stratifications de température peuvent se produire au point A.



Pour éviter cela, la partie supérieure de l'accumulateur peut être utilisée comme chambre de mélange (voir Illustr. 8.12, point B). Dans ce cas, cette zone doit être séparée dans l'accumulateur par une tôle perforée. Les raccords de tuyauterie de l'accumulateur sont idéalement effectués par le haut ou, si l'espace est limité, par le côté.

Illustration 8.13: Intégration hydraulique d'un accumulateur d'eau froide avec une chambre de mélange (B) dans la partie supérieure de l'accumulateur.



### Exemple: Installation avec accumulateur technique

Dans l'exemple de l'illustration 8.14, un accumulateur avec un petit volume de stockage a été sélectionné. Lorsque la machine frigorifique est arrêtée dès que l'accumulateur est chargé, celui-ci se décharge à nouveau immédiatement. Et immédiatement, la machine frigorifique se remet en marche – la machine se met en mode «pompage» (commutations rapides).

Il est donc conseillé de réguler les deux machines frigorifiques identiques de l'exemple de manière à ce que la deuxième s'arrête via la température de retour du circuit frigorifique lorsque la différence entre températures d'entrée et de sortie des évaporateurs a atteint la moitié de la valeur de dimensionnement.

### Gestion des accumulateurs pour les systèmes avec de plus grands accumulateurs

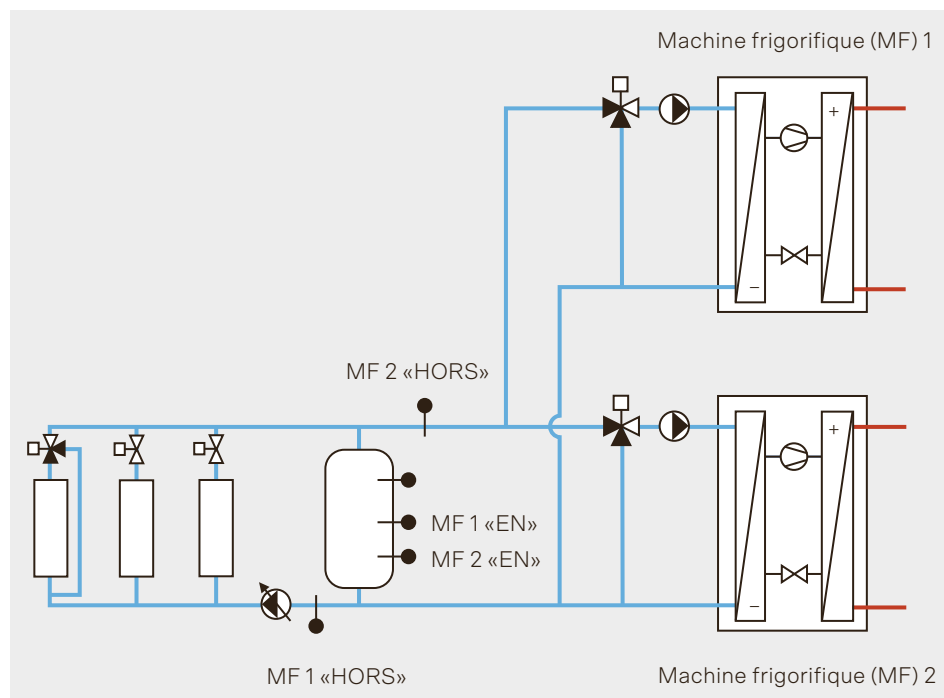
L'accumulateur est généralement géré sur la base des températures dans l'accumulateur (stratification). En outre, le débit volumique (direction du flux) dans la conduite vers l'accumulateur peut également être utilisé.

La puissance des machines frigorifiques dotées d'une large plage de régulation peut être spécifiée en fonction de la charge de l'accumulateur, par exemple en spécifiant la température d'entrée de l'évaporateur au moyen d'une régulation du mélange.

Lorsqu'on utilise un accumulateur latent, la densité énergétique est plus élevée qu'avec un accumulateur sans changement de phase – par conséquent, il est possible de stocker plus d'énergie dans le même volume. Cela signifie que les pics diurnes (stockage jour-nuit) et la puissance maximale requise de la machine frigorifique peuvent être réduits. Pour plus de détails sur les accumulateurs et leur dimensionnement, voir le Chapitre 10.4.

**Remarque:** Les machines frigorifiques qui peuvent fournir 100% de la chaleur produite au système de chauffage pour la production de chaleur ont besoin d'un volume d'accumulateur côté chauffage 1,3 fois plus grand que l'accumulateur frigorifique (considération énergétique).

Illustration 8.14:  
Exemple d'une installation de froid avec 2 machines frigorifiques identiques et un (petit) accumulateur technique. Les machines frigorifiques reçoivent différents signaux d'arrêt.



### Exécution des accumulateurs d'eau glacée

Lors de la conception de l'accumulateur, il est important de s'assurer qu'il n'y a pas de circulation indésirable due aux médiums qui entrent et sortent de l'accumulateur.

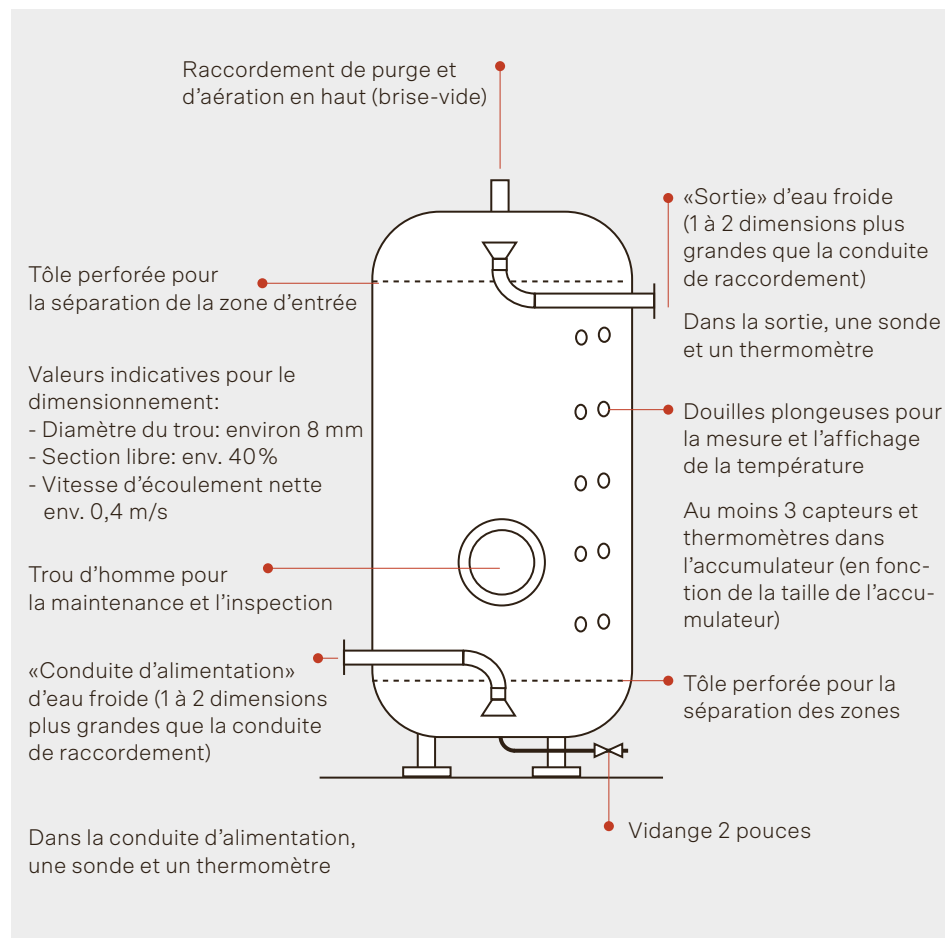


Illustration 8.15:  
Exemple de conception d'un accumulateur d'eau froide avec détails des équipements.

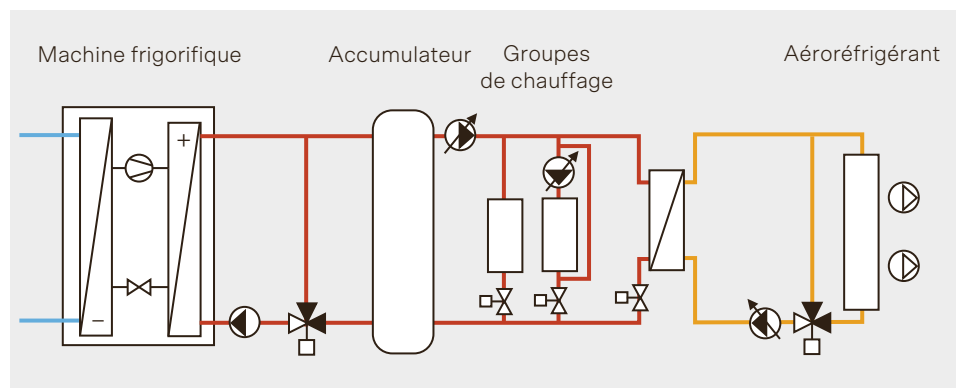
## 8.7 Intégration du post-refroidissement

L'intégration hydraulique du post-refroidissement dans le système de refroidissement et de chauffage comprend généralement une limitation minimale de la température d'entrée du condenseur avec une vanne à trois voies. Cela permet d'éviter que la température d'entrée ne devienne trop basse.

### Mesures de protection antigel pour les aéroréfrigérants

Les circuits de post-refroidissement fermés doivent toujours être remplis d'eau-glycol pour éviter qu'ils ne gèlent, surtout en hiver lorsqu'il n'y a pas de demande de (post)refroidissement. Les caloporteurs sans glycol ajouté doivent être soit vidés, soit chauffés électriquement en hiver. Les systèmes qui doivent être vidés présentent toujours un risque résiduel de gel et la vidange augmente la corrosion dans les tuyaux. Les systèmes à chauffage électrique doivent être évités autant que possible du point de vue de l'efficacité énergétique.

Illustration 8.16: Machine frigorifique avec intégration du post-refroidissement dans le réseau de chauffage. La chaleur est principalement utilisée par le système de chauffage. La chaleur ne pouvant pas être utilisée par le chauffage est évacuée dans l'environnement (post-refroidissement).



### Influence de la distance entre la machine frigorifique et l'aéroréfrigérant

Lorsque la distance entre la machine frigorifique et l'aéroréfrigérant est faible, une régulation de mélange du côté du condenseur avec une vanne à trois voies et une pompe est suffisante. À plus grande distance, si le médium met plus de 15 secondes à circuler entre le condenseur et l'aéroréfrigérant (ce qui correspond à environ 10 m), une deuxième pompe de circulation et une dérivation doivent être installés pour maintenir la régulation stable.

Pour les systèmes CVC, l'intégration selon l'illustration 8.17 est recommandée (voir également Chap. 9.5).

La distance (longueur) d'env. 10 mètres dépend de la vitesse d'écoulement et du diamètre de la conduite. La distance de 10 mètres est dérivée de la durée d'écoulement du fluide de 15 secondes sur cette distance.

La longueur est calculée en utilisant:

$$\text{Longueur} = \frac{4 \times 15 \text{ secondes} \times \text{débit volumique}}{(\text{diamètre intérieur de la conduite})^2 \times \pi}$$

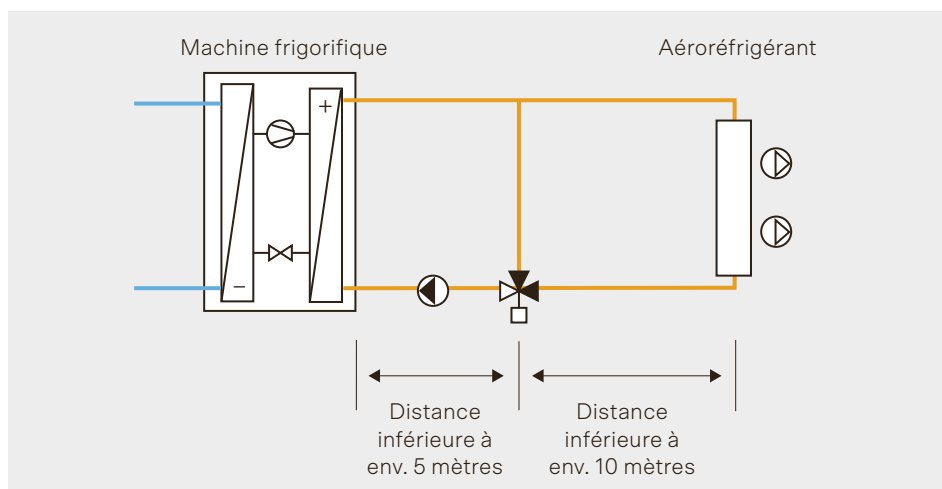


Illustration 8.17: Intégration hydraulique de l'aéroréfrigérant lorsque la distance entre le condenseur et l'aéroréfrigérant est courte.

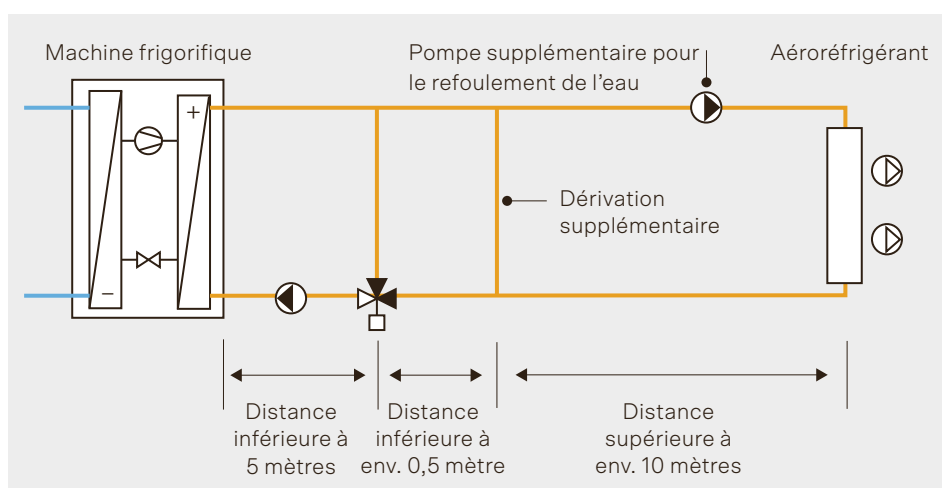


Illustration 8.18: Intégration hydraulique de l'aéroréfrigérant lorsque la distance entre le condenseur et l'aéroréfrigérant est plus grande.



## 8.8 Free-cooling

Dans le cas du free-cooling, le refroidissement s'effectue sans machine frigorifique. Le free-cooling peut fondamentalement être exploité avec un débit volumique variable et ne nécessite pas de stockage ou de séparation hydraulique. Lorsque la température extérieure est inférieure à 1°C, il y a un risque que le système d'eau gèle. Cela doit être évité par un circuit eau-glycol, un système de chauffage antigel ou un système d'auto-vidange.

Afin d'utiliser au mieux le free-cooling, le circuit du médium est dimensionné avec de faibles écarts de température de 3 à 4 K. Il en résulte des débits volumiques importants et des sections de canalisation correspondantes.

Pour les machines frigorifiques avec aérateurrefrigérant, l'intégration de la séparation du système d'échangeur de chaleur doit être prise en compte. Pour les échangeurs de chaleur, il faut s'attendre à des pertes de charge et à des écarts de température du côté primaire au côté secondaire de 2 K et à une différence de pression de 20 kPa maximum (également en fonctionnement à charge partielle).

L'intégration en série du free-cooling d'une machine frigorifique (Illustr. 8.21) est exigeante sur le plan hydraulique et technique, car la machine réagit de manière très sensible aux fluctuations et aux fortes variations de température.

Les Illustrations 8.19 à 8.23 montrent diverses intégrations. Les températures de départ du circuit frigorifique indiquées sont des valeurs indicatives, qui se réfèrent au site de Zurich-Kloten.<sup>3</sup>

### 1. Free-cooling par l'aérateurrefrigérant de la machine frigorifique

La chaleur est transférée soit via l'échangeur de chaleur vers l'aérateurrefrigérant, soit via les machines frigorifiques. En mode free-cooling, la machine frigorifique est arrêtée (mode bivalent-alternatif). Convient généralement aux installations avec des consommateurs de froid qui fonctionnent avec la température de départ du circuit frigorifique suivante:

- pour le post-refroidissement sec supérieur à 22 °C
- pour les aérateurrefrigérants humides supérieurs à 22 °C

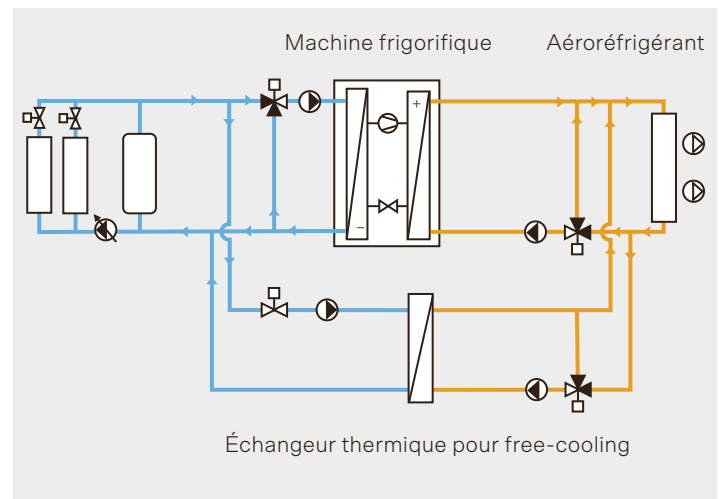
Avantage

- Variante rentable

Inconvénients

- La différence de température à travers l'échangeur de chaleur réduit le potentiel.

Illustration 8.19:  
1. Free-cooling via l'aérateurrefrigérant du dispositif de réfrigération.



<sup>3</sup> Source: ZHAW, Studie Free Cooling in der Klimakälte: Étude du potentiel en Suisse, (2018)

## 2. Free-cooling via un aéroréfrigérant supplémentaire connecté en parallèle

La chaleur est transférée soit directement via l'aéroréfrigérant du free-cooling, soit via la machine frigorifique vers l'aéroréfrigérant. En mode free-cooling, la machine frigorifique est arrêtée (mode bivalent-alternatif).

Convient généralement aux installations avec des consommateurs de froid qui fonctionnent avec la température de départ du circuit frigorifique suivante:

- pour le post-refroidissement sec supérieur à 22  C
- pour les aéroréfrigérants humides supérieur à 18  C

Avantage

- plus efficace que la variante 1

Inconvénients

- intégration plus complexe
- Utiliser de l'eau glycolée comme fluide frigoporteur pour la protection antig l ou utiliser un aéroréfrigérant pour un free-cooling qui s'auto-vidange.

## 3. Free-cooling via un aéroréfrigérant supplémentaire intégré en série

La chaleur est transférée soit

- complètement via l'aéroréfrigérant free-cooling, soit
- complètement via la machine frigorifique et l'aéroréfrigérant ou
- prérefroidi via l'aéroréfrigérant free-cooling et ensuite transférée via la machine frigorifique et l'aéroréfrigérant

En mode free-cooling, la machine frigorifique peut agir comme un appoint (fonctionnement bivalent-parallèle).

Convient généralement aux installations avec des consommateurs de froid qui fonctionnent avec la température de départ du circuit frigorifique suivante:

- pour le post-refroidissement sec supérieur à 18  C
- pour les aéroréfrigérants humides supérieur à 14  C

Avantage

- variante la plus efficace (avec la variante 5)

Inconvénients

- intégration plus complexe
- Utiliser de l'eau glycolée comme fluide frigoporteur pour la protection antig l ou utiliser un aéroréfrigérant pour un free-cooling qui s'auto-vidange.

Illustration 8.20:  
2. Free-cooling via un échangeur de chaleur supplémentaire raccod  en parallèle.

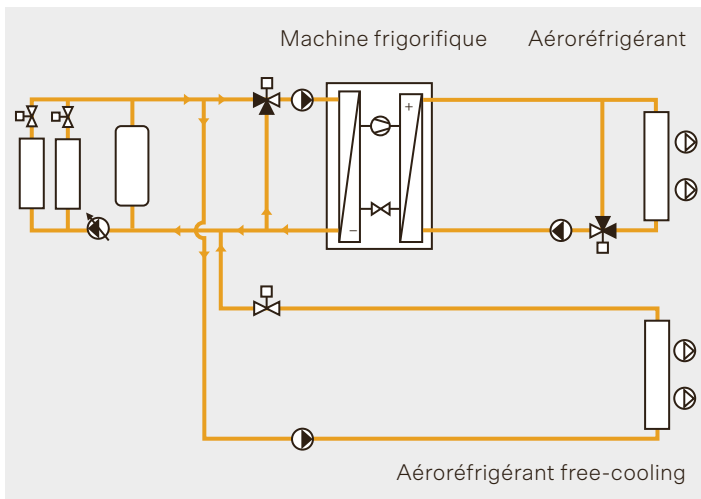
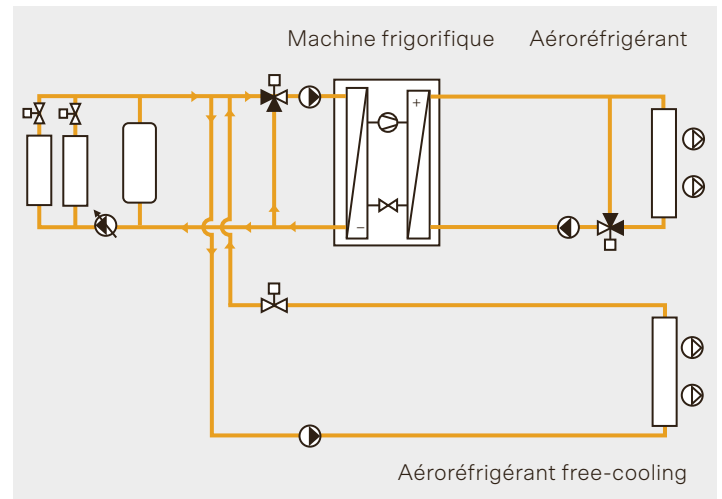


Illustration 8.21:  
3. Free-cooling via un échangeur de chaleur supplémentaire raccod  en série.



#### 4. Free-cooling avec condensation directe via un aérateurfrigoriférant supplémentaire connecté en parallèle

La chaleur est transférée soit directement via l'aérateurfrigoriférant du free-cooling, soit directement via la machine frigorifique (condenseur).

En mode free-cooling, la machine frigorifique est arrêtée (mode bivalent-alternatif).

Convient généralement aux installations avec des consommateurs de froid qui fonctionnent avec la température de départ du circuit frigorifique suivante:

- pour le post-refroidissement sec supérieur à 22 °C
- pour les aérateurfrigoriférants humides supérieur à 18 °C

Avantage

- plus efficace que la variante 1

Inconvénients

- intégration plus complexe
- Utiliser de l'eau glycolée comme fluide frigoporteur pour la protection antigel ou utiliser un aérateurfrigoriférant pour un free-cooling qui s'auto-vidange.

#### 5. Free-cooling avec condensation directe via un aérateurfrigoriférant supplémentaire intégré en série

La chaleur est transférée soit:

- complètement via l'aérateurfrigoriférant de free-cooling soit
- complètement via la machine frigorifique et le condenseur ou

- prérefroidi via l'aérateurfrigoriférant free-cooling et ensuite transféré via la machine frigorifique et le condenseur

En mode free-cooling, la machine frigorifique peut agir comme un appoint (fonctionnement bivalent-parallèle).

Convient généralement aux installations avec des consommateurs de froid qui fonctionnent avec la température de départ du circuit frigorifique suivante:

- pour le post-refroidissement sec supérieur à 18 °C
- pour les aérateurfrigoriférants humides supérieur à 14 °C

Avantage

- variante la plus efficace (avec la variante 3)

Inconvénients

- intégration plus complexe
- Utiliser de l'eau glycolée comme fluide frigoporteur pour la protection antigel ou utiliser un aérateurfrigoriférant pour un free-cooling qui s'auto-vidange.

Les systèmes à condensation directe (Illustr. 8.22 et 8.23) ne présentent que de très légers avantages en termes d'efficacité énergétique par rapport aux systèmes à transfert de chaleur (Illustr. 8.20 et 8.21).

Illustration 8.22:  
4. Condensation directe avec free-cooling via un échangeur de chaleur raccordé en parallèle.

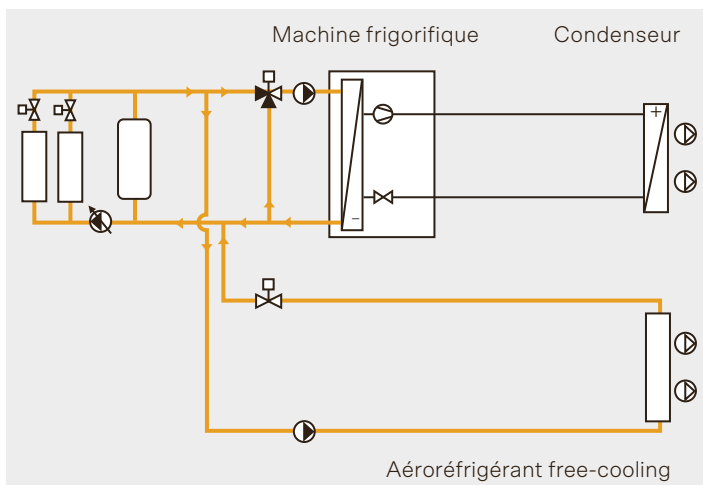
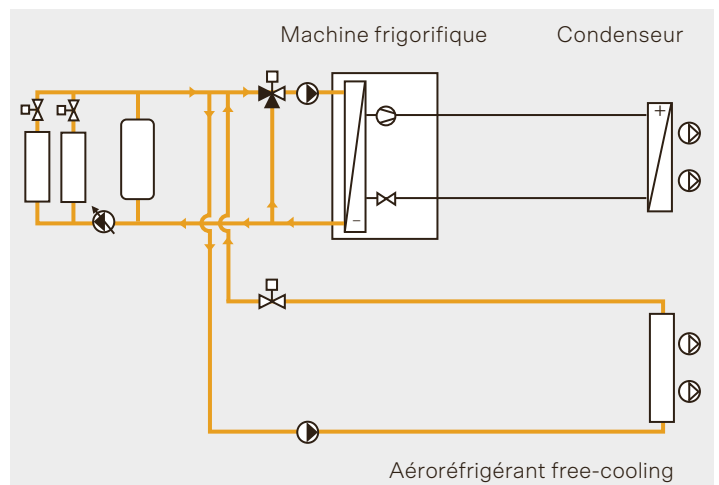


Illustration 8.23:  
5. Condensation directe avec free-cooling via un échangeur de chaleur raccordé en série.



## 8.9 Dégagement de chaleur

### Exploitation de la chaleur

La chaleur engendrée par la machine frigorifique peut être extraite à différents niveaux de température, c’est-à-dire dans le désurchauffeur (gaz chauds), dans le condenseur et dans le sous-refroidisseur (voir également le Chap. 5.6).

### Gaz chaud

L’utilisation directe des gaz chauds pour le chauffage et la production d’eau chaude sanitaire occupe 10 à 20 % de la puissance du condenseur. Le reste de la chaleur est évacué par l’aéroréfrigérant.

### Gaz chaud et chaleur de condensation

Le gaz chaud est utilisé directement pour le chauffage à 50 °C. Le reste de la chaleur est évacué dans l’accumulateur thermique. De là, la chaleur est utilisée pour le chauffage. La chaleur excédentaire qui ne peut être utilisée dans le système de chauffage est évacuée par l’aéroréfrigérant.

Un inconvénient de cette solution est le débit très variable dans le sous-refroidisseur (en fonction de la position de la vanne).

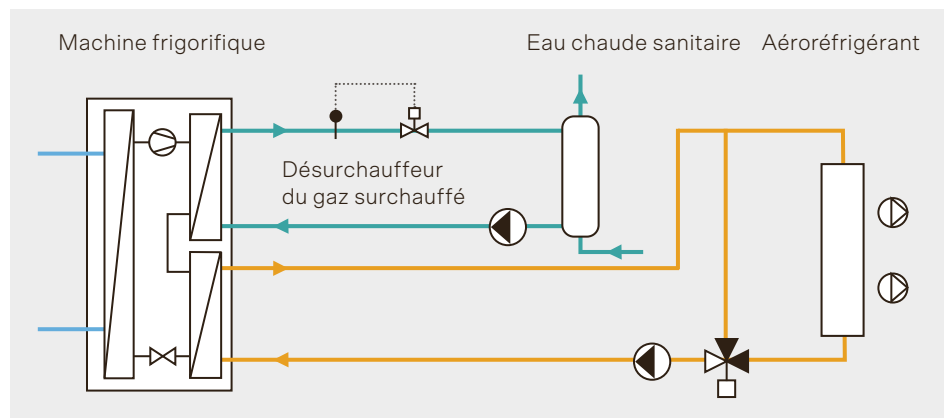


Illustration 8.24: Possibilité d'utiliser directement le gaz surchauffé.

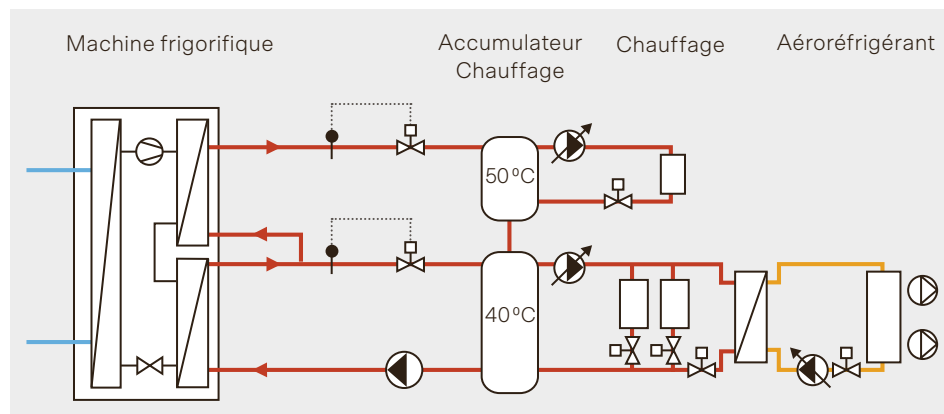


Illustration 8.25: Possibilité d'utiliser le gaz surchauffé et la chaleur de condensation.

### Sous-refroidisseur

Le sous-refroidisseur améliore l'efficacité énergétique de l'installation et peut être:

- intégré dans le condenseur ou
- dimensionné comme échangeur de chaleur séparé après le condenseur

Le meilleur effet est obtenu en utilisant un échangeur de chaleur séparé pour le sous-refroidissement. (Voir également Approfondissement 5 sur le sous-refroidissement dans l'Annexe 11.8 à la page 207).

La meilleure efficacité (écologique et économique) est obtenue lorsque la chaleur du condenseur est évacuée par une pompe à débit variable. Toutes les températures minimales et maximales du circuit du condenseur doivent alors être assurées et respectées.

La puissance électrique de la pompe ne doit pas dépasser 0,4 % de la puissance thermique évacuée. Cela s'applique également en charge partielle. Ce rapport ne peut être assuré que si le volume de refoulement de la pompe est proportionnel à la puissance thermique.

La température de sortie peut être assurée en réglant le débit volumique (pompe ou vanne de mélange). Le débit volumique variable garantit ainsi la température et l'efficacité.

La façon la plus courante de maintenir les températures pendant l'intégration hydraulique est d'utiliser une vanne à trois voies (circuit de mélange) pour contrôler la température d'entrée ou de sortie. La régulation de la température

d'entrée est nécessaire pour les opérations critiques de démarrage ou les températures de retour fortement fluctuantes. Un circuit de mélange peut également fonctionner avec des débits volumiques variables. Tous les circuits doivent toujours être validés par écrit avec le fournisseur de la machine frigorifique.

## 8.10 Exploitation du froid et de la chaleur en tant que système global

Le schéma (simplifié) (Illustr. 8.27) montre la manière dont les différents composants et circuits sont combinés pour former un système global. L'exemple décrit un système que l'on est susceptible de trouver dans des installations plus grandes (à partir de 100 kW d'exploitation du froid et de la chaleur). Pour de plus petites installations (p.ex. les installations sans champs de sondes géothermiques), les éléments et les conduites correspondants ne sont pas nécessaires. Le schéma avec des explications supplémentaires sur les différents états de fonctionnement se trouve également dans l'Annexe 11.6.

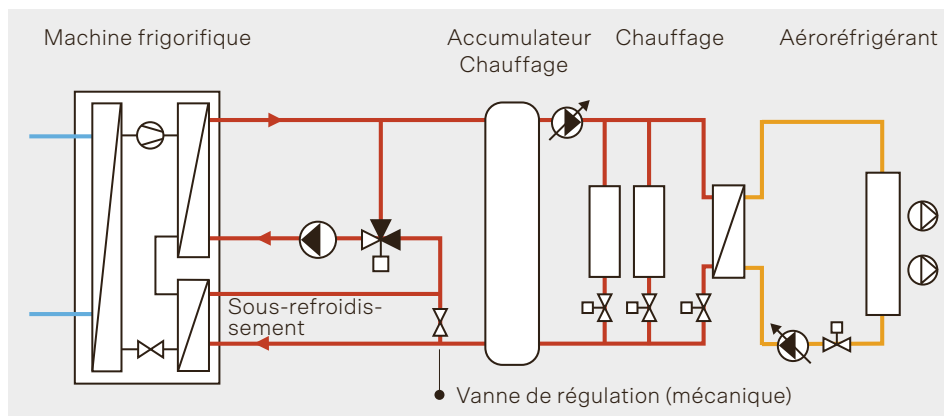


Illustration 8.26:  
Possibilité d'utiliser le sous-refroidissement pour améliorer encore l'efficacité énergétique.

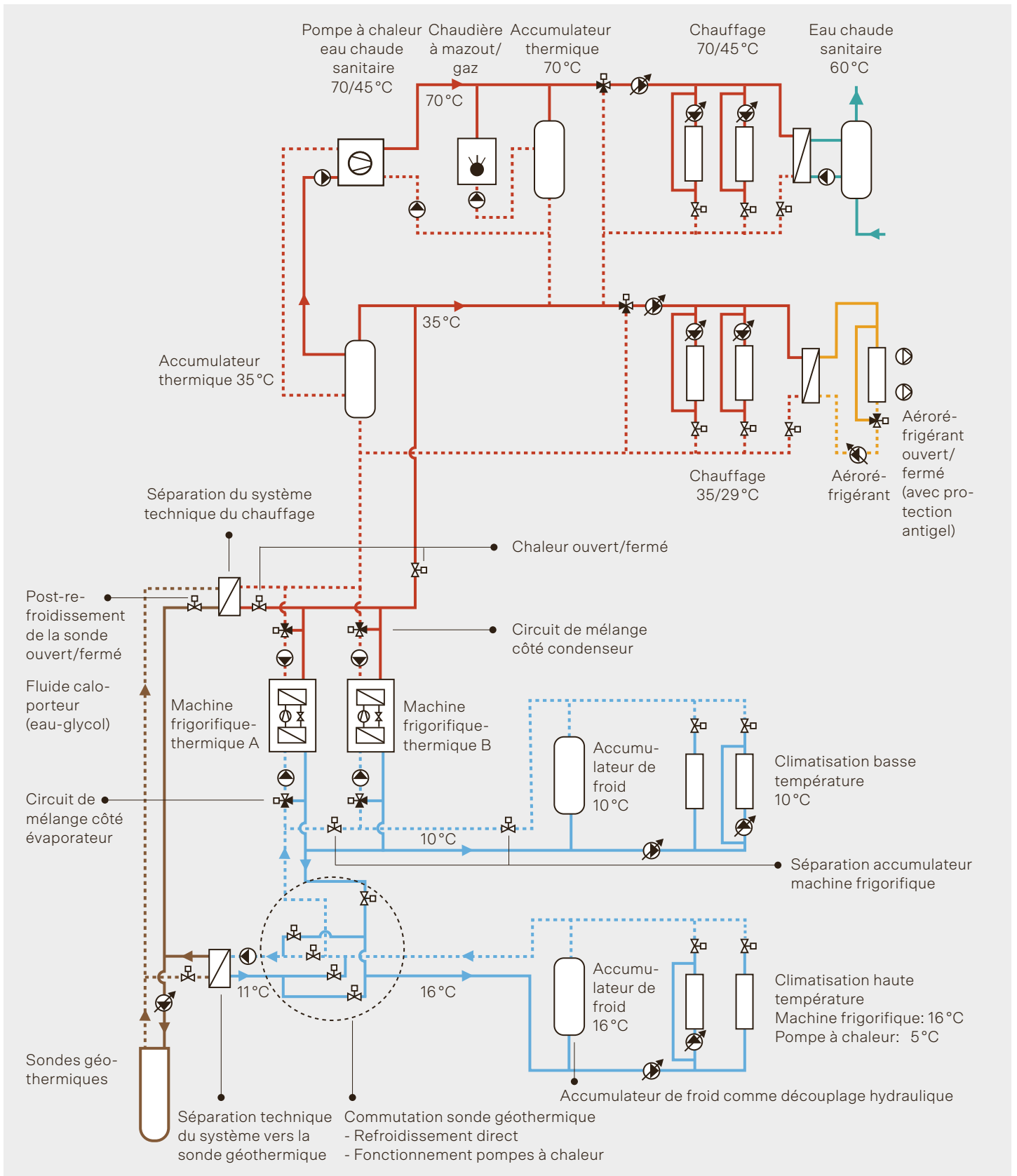


Illustration 8.27: Exemple d'une installation frigorifique de climatisation avec deux réseaux de froid, récupération de chaleur et avec sondes géothermiques.

## 8.11 Système de distribution

### Conduites

Pour le transport de l'eau ou d'un mélange eau-glycol, des conduites en acier ou en matière synthétique sont utilisés dans le système de climatisation. Les températures du fluide caloporteur ou frigorigène sont comprises entre 0 et 80 °C.

La pression nominale est la pression à laquelle les conduites, tuyauteries, brides et raccords profilés sont dimensionnés. Dans les techniques de climatisation et de refroidissement, les pressions nominales PN6, PN10 ou PN16 sont normalement utilisées.

Le traitement de l'eau pour les circuits fermés et ouverts se trouve dans la Directive SICC «Qualité de l'eau dans les installations techniques du bâtiment» (BT102-01).

### Tubes en acier inoxydable

Il est généralement recommandé que les tuyaux de refroidissement soient en acier inoxydable (acier chrome-nickel). Jusqu'à un diamètre d'environ 100 mm, il est avantageux d'utiliser des tuyaux en acier inoxydable avec des raccords à sertir.

Avantages des tuyaux en acier inoxydable

- ne rouille pas
- Surfaces lisses
- Autoporteur
- Non inflammable
- Montage rapide, réalisée par du personnel CVC

Inconvénients des tuyaux en acier inoxydable

- Matériau plus cher que les tuyaux en acier normaux (ST-33, ST-42)
- Choix limité de raccords
- Nécessitent plus d'espace pour les raccords (à prendre en compte dans les espaces restreints)
- Plus grande dilatation

### Corrosion interne

Dans les circuits ouverts (p. ex. avec une machine frigorifique avec aéroréfrigérant à évaporation ouverte), l'utilisation de tuyaux en acier normal (St 33, St 42) est problématique à cause de la corrosion. L'adjonction d'inhibiteurs de protection à la corrosion permet de réduire en partie ces risques.

Le risque de corrosion est particulièrement élevé dans les systèmes de refroidissement par évaporation ouverts, car l'eau est saturée en oxygène et favorise donc fortement la corrosion. C'est pourquoi l'utilisation d'acier inoxydable est recommandée pour ces applications; les tuyaux en matière synthétique peuvent également être utilisés comme variante.

### Corrosion externe

Les travaux de protection contre la corrosion doivent être effectués par une entreprise spécialisée. Il est essentiel d'éviter que les tuyaux situés sous l'isolation se corrodent sans qu'on s'en aperçoive à cause d'un pare-vapeur mal réalisé.

Le traitement de surface pour la protection contre la corrosion des tuyaux en acier ST-33 comprend:

- Nettoyage de la surface (sablage, soudures avec une brosse en acier ou une meule)
- Couche d'apprêt
- Couche de finition

Recommandation: épaisseur minimale de la couche 140 µm

### Tuyaux en matière synthétique

Le polypropylène est souvent utilisé comme matériau. L'utilisation de tuyaux en matière synthétique présente les avantages et les inconvénients suivants:

Avantages

- Résistant à la corrosion
- Surfaces lisses
- Amortissement du bruit et des vibrations
- Isolation

#### Inconvénients

- Faible résistance
- Élasticité élevée
- Installation par des spécialistes des tuyaux en matière synthétique
- Manque de raccords et de connexions sur les appareils
- Sensible à la température et aux chocs
- Inflammable

#### Supports de tuyaux

Lors du montage des tuyaux, veiller à ce qu'aucun pont thermique ne soit créé.

#### Isolation contre le froid

L'isolation contre le froid réduit les pertes de froid dans les tuyaux et les raccords et augmente l'efficacité énergétique du système.

#### Protection contre la condensation

Dans le cas des conduites de froid, la température tombe en dessous du point de rosée directement sur la surface froide de la conduite – la condensation se forme. Pour empêcher la vapeur d'eau de pénétrer dans l'isolation thermique et la surface de la conduite, la surface extérieure de l'isolation froide doit être conçue comme un pare-vapeur. Ceci est particulièrement important pour les conduites de froid fabriquées en acier normal. Dans ce cas, une protection inadéquate contre la corrosion en surface peut entraîner des dommages dus à la corrosion qui passent inaperçus.

L'efficacité énergétique des systèmes de distribution des conduites de refroidissement peut être augmentée par l'uti-

lisation ciblée du bon matériau d'isolation (mot clé: conductivité thermique) et surtout par une épaisseur d'isolation suffisamment importante. Par conséquent, l'isolation ne doit pas seulement être dimensionnée en fonction de la protection contre la condensation et l'humidité. Il s'agit plutôt de réduire au maximum les pertes d'énergie et d'assurer un fonctionnement économique.

#### Protection contre l'humidité

Un pare-vapeur qualitativement approprié ou une isolation suffisamment épaisse empêchent une augmentation inacceptable de l'humidité dans le matériau isolant. Plus le pare-vapeur est étanche et plus l'isolation est épaisse (volumineuse), plus le volume d'humidité absorbée par le matériau isolant est faible.

#### Rentabilité des matériaux d'isolation

Deux matériaux d'isolation sont principalement utilisés pour les conduites de refroidissement (réfrigération): le caoutchouc synthétique et les coques de tuyaux PIR (polyisocyanurate) laminées d'aluminium. Le caoutchouc est flexible, facile à mettre en œuvre (même avec des pièces moulées) et garantit la prévention de la condensation grâce à un indice élevé de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Les matériaux d'isolation PIR ont une très faible conductivité thermique et sont donc extrêmement efficaces sur le plan énergétique. Pour empêcher la pénétration de l'humidité, un pare-vapeur (p.ex., un laminé d'aluminium) doit être installé sur le matériau d'isolation PIR.

Illustration 8.28:  
Support de tuyau isolé pour une conduite de froid. Il permet d'éviter les ponts thermiques et la formation de condensats.



Illustration 8.29:  
Dommages dus à la corrosion sur la conduite d'eau froide (sous l'isolation).



### Caoutchouc

Pour l'isolation en caoutchouc, il existe des colliers spéciaux pour tuyaux de froid qui peuvent être utilisés pour les systèmes de distribution. Le tuyau en caoutchouc peut donc être simplement collé au collier de serrage du tuyau de froid.

### Système PIR en aluminium

L'isolation des supports de tuyaux (pièces moulées) avec du PIR-Alu demande du soin et prend du temps. Les coques et les raccords PIR doivent être enduits d'un bitume épais pour rendre le système – notamment les joints d'isolation thermique (surfaces de raccordement) – étanche à la diffusion de vapeur. Il n'existe pas (encore) de suspension de tuyau appropriée. Toutefois, si l'épaisseur de l'isolant est suffisante, il est possible d'isoler par-dessus le support du tuyau; cela permet également de garantir le pare-vapeur.

### Épaisseurs d'isolation

D'un point de vue économique et écologique, il est judicieux d'isoler les conduites de refroidissement contre l'eau de condensation (c.-à-d. comme protection contre l'humidité) d'une part, ce qui nécessite de faibles épaisseurs d'isolation. D'autre part, l'efficacité énergétique doit également être prise en compte avec les «épaisseurs d'isolation économiques». En outre, il s'agit également de prendre en compte les systèmes hybrides qui chauffent en hiver et refroidissent en été. Dans le domaine de l'isolation thermique, les exigences du Modèle de prescriptions énergétiques des cantons MoPEC sont déterminantes. De même, les recommandations concernant les épaisseurs d'isolation des conduites de refroidissement doivent être respectées (Illustr. 8.30).

**Remarque:** La Notice technique 5/2021 «Isolation dans la technique du bâtiment» de suissetec comprend des données détaillées sur les épaisseurs d'isolation recommandées.

### Protection contre l'incendie

Dans le cas des installations frigorifiques de climatisation, il convient de prêter attention aux traversées de tuyaux, à l'isolation des tuyaux dans les voies d'évacuation, à l'isolation du compartiment coupe-feu et à la machine frigorifique (fluides frigorigènes inflammables) en ce qui concerne la protection contre l'incendie. En raison des exigences variables (localement) en matière de protection contre l'incendie, il est recommandé que le planificateur responsable de la protection contre l'incendie détermine les mesures nécessaires avec les autorités à un stade précoce du projet.

### Caloporteurs et frigoporteurs

De l'eau propre et traitée (inhibée contre la corrosion) est utilisée comme moyen de chauffage ou de refroidissement. Voir également la Directive SICC «Qualité de l'eau pour les installations techniques du bâtiment».

Pour les applications nécessitant une protection contre le gel, on utilise des mélanges eau-glycol avec protection contre la corrosion.

- Les fluides à base d'éthylène glycol sont utilisés lorsque des performances maximales de transfert de chaleur et une solution économique sont essentielles.
- Les fluides à base de propylène glycol sont utilisés lorsque des fluides de transfert de chaleur à faible toxicité sont requis.

Illustration 8.30:  
Épaisseurs minimales d'isolation recommandées pour les conduites d'eau glacée installées à une température ambiante de + 25 °C.

Isolation avec	Coque dure PIR		Caoutchouc	
	$\lambda \leq 0,028$		$\lambda = 0,033$	
Température de l'eau glacée	jusqu'à DN 65	DN 80 à DN 200	jusqu'à DN 65	DN 80 à DN 200
6 °C à 14 °C	30 mm	40 mm	19 mm	45 mm
de 14 °C à 19 °C	30 mm	30 mm	13 mm	19 mm

Les mélanges eau-glycol sans ajout d'additifs anticorrosion sont nettement plus corrosifs que l'eau pure.

Les fluides caloporteurs contenant du glycol se distinguent par la qualité de leur protection contre la corrosion. La norme d'essai de corrosion ASTM D 1384 peut être utilisée comme guide lors du choix du fluide caloporteur approprié. Il ne faut pas mélanger différents fluides caloporteurs, en particulier ceux de différents fabricants, car des incompatibilités et des dommages consécutifs dus à la corrosion peuvent se produire.

La résistance au gel dépend du type de glycol utilisé et de la teneur du mélange avec l'eau et est basée sur la température la plus basse sur le site d'installation (voir Illustr. 8.31).

Il convient de noter que la concentration minimale du mélange est d'environ 20% (dépend du produit et du matériau). Une concentration plus faible peut rendre le fluide caloporteur chimiquement agressif. Le glycol est disponible sous forme de concentré ou de mélange prêt à l'emploi. Pour les systèmes comportant une tuyauterie importante et une faible circulation, il est recommandé de diluer le concentré avec de l'eau en dehors du système jusqu'à la concentration souhaitée.

Le glycol et l'eau mélangés de manière homogène, ils ne se séparent pas.

**Important:** Lorsque du glycol pur est ajouté à un système déjà rempli d'eau, il ne se mélange pas automatiquement à l'eau. Cela signifie que la protection contre le gel n'est pas garantie et que le système peut être endommagé.

Pour les nouveaux remplissages, la concentration, la valeur du pH et la concentration de l'inhibiteur doivent être contrôlées pour la première fois après 3 mois. Ce premier contrôle fait partie du contrat de travail.

Ensuite, la résistance au gel doit être contrôlée chaque année, ce qui peut être fait par exemple à l'aide d'un réfractomètre. Certains fabricants proposent également à leurs clients un service d'analyse permettant de déterminer l'état réel du fluide dans le système.

Pour des raisons environnementales, il faut ajouter le moins de glycol possible. L'élimination du glycol doit être clarifiée avec l'autorité locale de protection de l'environnement. Le déversement dans les canalisations des eaux usées n'est pas autorisé sans autorisation écrite préalable.

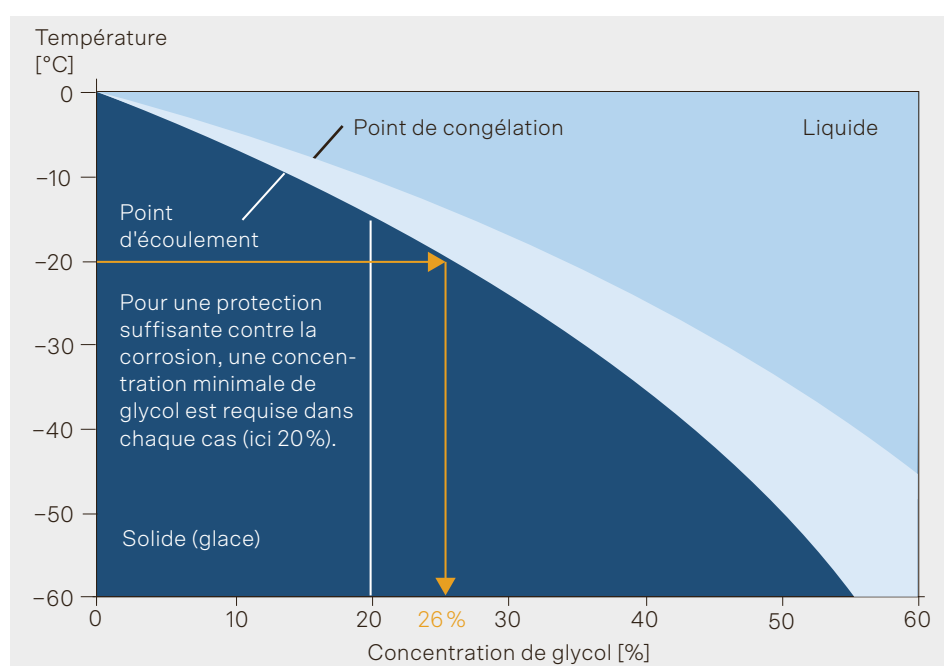


Illustration 8.31: Résistance au gel du mélange eau-glycol. Exemple: Lorsque la résistance au gel est requise selon un dimensionnement jusqu'à -20°C, cela donne une teneur en glycol dans l'eau de 26% selon le graphique.

## Digression

### Accumulateur de glace

L'eau est transformée en glace dans un accumulateur à glace. Au cours de ce processus, la chaleur latente – et donc l'énergie – est également stockée. Presque 100 % de cette énergie est libérée dans le frigoroporteur au moment voulu.

L'accumulateur de glace est utilisé:

- pour interrompre les pics d'énergie coûteux
- pour utiliser le prix plus avantageux de l'électricité la nuit dans le cas des tarifs jour-nuit
- pour augmenter la sécurité d'approvisionnement avec une réserve d'énergie frigorifique – p. ex. dans les installations industrielles ou les centres de calcul pour pallier une panne d'électricité ou de la machine frigorifique.

Les accumulateurs de glace sont connectés en série ou en parallèle à l'évaporateur de la machine frigorifique. Le choix du circuit dépend du concept du système et du mode de fonctionnement. Lorsqu'il y a plusieurs machines frigorifiques, on les branche en parallèle.

Un accumulateur de glace présente toutefois également des inconvénients:

- Coûts élevés
- Encombrement important
- Efficacité énergétique relativement faible du système en raison de la faible température d'évaporation en mode charge – surtout si les températures de l'eau glacée des consommateurs sont plus élevées.

Étant donné qu'un tarif standard s'applique souvent à l'électricité aujourd'hui et qu'une tarification à la puissance n'est pas faite, l'installation d'un accumulateur de glace n'est souvent pas économique.

En lieu et place d'un accumulateur d'eau ou de glace, on peut utiliser des accumulateurs de chaleur latente avec des matériaux à changement de phase ayant des températures de solidification différentes. Ceux-ci utilisent le changement de phase du médium à la température du fluide frigorigène pour stocker l'énergie de refroidissement.

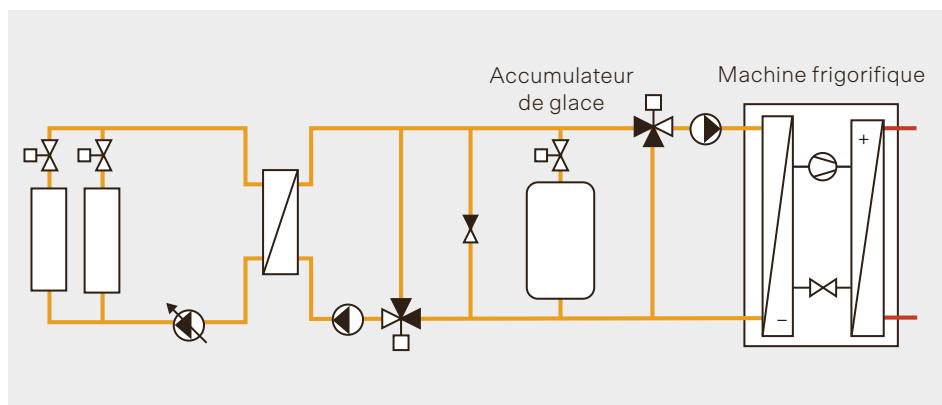


Illustration 8.32: Installation de stockage de la glace avec 3 modes de fonctionnement:  
1. Charger l'accumulateur  
2. Décharger l'accumulateur  
3. Fonctionnement des machines frigorifiques

## 10 points relatifs au système hydraulique des installations frigorifiques

1. Les défauts de l'hydraulique entraînent généralement d'importants problèmes de fonctionnement et ne peuvent être corrigés qu'ultérieurement et à grands frais.
2. Les différents circuits sont séparés les uns des autres hydrauliquement ou mécaniquement (découplage, séparation du système) afin que les différentes pompes ne puissent pas s'influencer activement.
3. L'entraînement de la vanne de mélange dans le circuit du condenseur ne doit pas avoir un temps de fonctionnement supérieur à 30 secondes.
4. Pour permettre le démarrage de la machine frigorifique, certaines températures doivent régner au niveau du condenseur et de l'évaporateur et qui doivent être traversées avec le fluide frigoporteur ou caloporteur.
5. Les débits volumiques via l'évaporateur et le condenseur peuvent également être assurés par un débit volumique variable de la pompe.
6. Les accumulateurs permettent une optimisation du comportement du système hydraulique. Une attention particulière doit être accordée à la stratification des températures lors de leur intégration.
7. Aux fins d'entretien de la machine frigorifique et du système caloporteur et frigoporteur, il faut entre autres des robinets de vidange, des robinets de purge, des embouts Twinlock pour les mesures mobiles de température et des contrôleurs de débit. En outre, une connexion à baïonnette facilite le nettoyage du condenseur.
8. Les systèmes de tuyauterie menant à l'extérieur (p. ex. vers l'aéroréfrigérant) doivent être protégés contre le gel (eau-glycol, ruban chauffant, vidange automatique).
9. Les conduites de froid doivent être isolées contre la condensation et les pertes thermiques. L'isolation doit être posée de manière complètement étanche à la diffusion.
10. Avant la remise à l'exploitant, il est impératif de régler correctement les débits du circuit consommateurs de chaleur et de froid (équilibre hydraulique).



## Commande et régulation

**La fonctionnalité et l'hydraulique des installations frigorifiques sont plus complexes que celles des installations de chauffage. Les côtés évaporateur et condenseur sont fortement liés et s'influencent mutuellement. En outre, la marge de manœuvre est étroite en ce qui concerne la pression et la température: même un bref dépassement de la pression du côté du condenseur peut entraîner un arrêt de sécurité de l'installation en raison de la haute pression. Cela impose des exigences élevées en matière de commande et de régulation.**

### 9.1 Généralités

Le type de commande et de régulation dépend essentiellement du type de refroidissement. Les installations frigorifiques à évaporation directe ou à condensation directe sont régulées ou commandées différemment par rapport aux systèmes comportant un circuit intermédiaire avec un fluide frigoporteur ou caloporteur.

#### Installation avec évaporation directe et condensation directe

Dans une installation à évaporation directe et à condensation directe, l'unité de commande et de régulation intégrée à la machine frigorifique prend en charge les fonctions correspondantes. Dans ce cas, la responsabilité de l'ensemble de l'installation, y compris la régulation, incombe au fournisseur de la machine frigorifique. Si nécessaire, la communication entre l'installation frigorifique et la

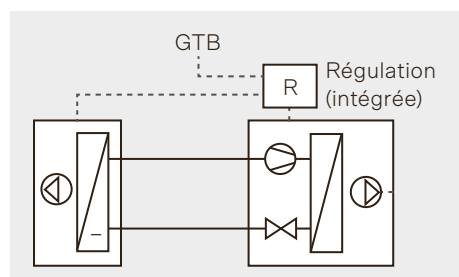
gestion technique du bâtiment (GTB) est assurée par des interfaces appropriées. Avec ces systèmes, l'énergie frigorifique ne peut pas être stockée. Par conséquent, ces installations doivent disposer d'une large plage de régulation (20–100 % de la puissance).

#### Installations avec circuits intermédiaires

Les installations avec circuits intermédiaires (circuit évaporateur et condenseur) sont assemblées à partir de divers composants. Pour que l'ensemble de l'installation fonctionne correctement, une coordination précise entre les services spécialisés et les personnes concernées est absolument indispensable: CVC, MCR, planification électrique et fabricants de machines frigorifiques.

Un aspect central est ici la définition des interfaces entre les différents corps de métier. Il existe différentes approches de cette tâche, qui doit être résolue dès le début du projet (voir Chap. 9.2).

Illustration 9.1:  
Machine frigorifique à évaporation directe et à condensation directe avec régulation intégrée.



La stabilité de la régulation est fortement influencée par le système hydraulique. Les erreurs dans l'intégration hydraulique d'une installation frigorifique ne peuvent être corrigées par la régulation.

## 9.2 Approches de la définition des interfaces

La communication entre les différents composants de l'installation frigorifique (production de froid, groupes de consommateurs, aéroréfrigérants etc.) s'effectue aujourd'hui le plus souvent par le biais de plusieurs régulations provenant de différents fournisseurs.

La manière dont les interfaces sont coordonnées dépend de différents facteurs:

- Structure de l'installation, principes de fonctionnement, facilité d'utilisation, concept d'alarme
- Exigences en matière de surveillance à distance
- Concept de maintenance
- Matériel et logiciels

La machine frigorifique-thermique (MFT) peut être intégrée au système global de différentes manières. Trois exemples de définition d'interface sont donnés ci-dessous (Illustr. 9.2).

### Interfaces solution A: Machine frigorifique-thermique seule

La machine frigorifique est commandée et régulée de manière autonome par son propre API (Automate programmable industriel). Il prend en charge la régulation de la puissance de la machine, y compris les fonctions de sécurité telles que le retour d'information sur le fonctionnement des pompes, la surveillance du débit etc. Dans le cas de la régulation de la puissance, il est souvent possible de la commander via un signal externe. La machine frigorifique est mise en marche et arrêtée par le système de gestion technique du bâtiment, qui intègre également les pompes, les vannes de régulation et d'autres composants du système. Cette solution est souvent choisie pour les groupes frigorifiques «standard» dont la fonctionnalité de l'unité de commande intégrée est limitée.

L'inconvénient de cette solution est que les responsabilités sont différentes pour la commande de la machine frigorifique et pour le contrôle de niveau supérieur.

Illustration 9.2: Prise en compte de l'interface d'une installation frigorifique du point de vue de l'ingénierie de contrôle. Il existe trois solutions possibles (A, B et C) pour placer judicieusement les interfaces (MCR: mesure, contrôle, régulation).

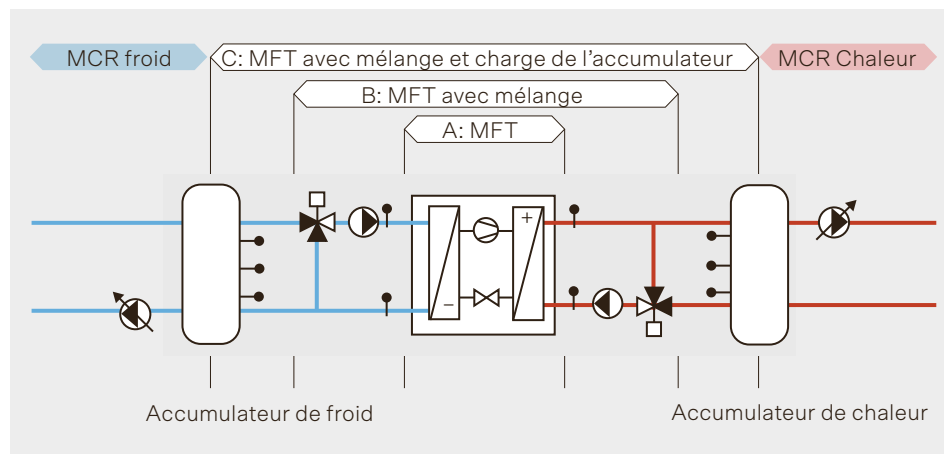
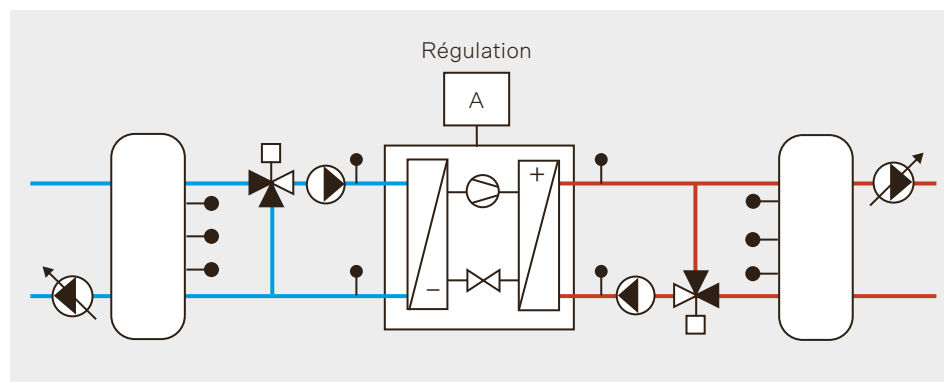


Illustration 9.3: Interfaces solution A: Machine frigorifique-thermique (MFT).



Comme les commandes proviennent de différents fournisseurs, il n'y a pas un responsable unique de l'optimisation de l'ensemble du système.

Lors du dépannage et des travaux de maintenance sur la machine frigorifique, le spécialiste responsable du système supérieur doit généralement être également présent.

#### Interfaces solution B: Machine frigorifique-thermique avec mélange

Le système de commande de la machine frigorifique commande également les pompes et les vannes à 3 voies du circuit de mélange:

- Libération ou commutation des pompes.
- Signaux pour la commande des vannes de régulation

Cela signifie que les responsabilités en matière de planification, de mise en service, de dépannage et de maintenance sont clairement définies. Le spécialiste de l'entretien de l'entreprise de froid peut également faire fonctionner les pompes et les vannes de régulation et ne dépend

pas de l'aide du fournisseur du système de commande de niveau supérieur. Cette variante a fait ses preuves dans la pratique.

#### Interfaces solution C: Machine frigorifique-thermique jusqu'à et y compris le chargement de l'accumulateur

Dans cette variante, le fournisseur de la machine frigorifique est responsable de la commande et de la régulation de l'ensemble de la production de froid et de chaleur. Cela inclut également la gestion de l'accumulateur et éventuellement le post-refroidissement. La régulation du fabricant peut donc également prendre en charge la gestion de l'accumulateur et de l'ensemble de l'installation. À cet égard, il s'agirait de la solution d'interface idéale.

La condition préalable est que le fournisseur de la machine dispose du savoir-faire correspondant en matière de technologie de commande et de régulation. Seuls quelques fabricants sont en mesure d'offrir ce service aujourd'hui.

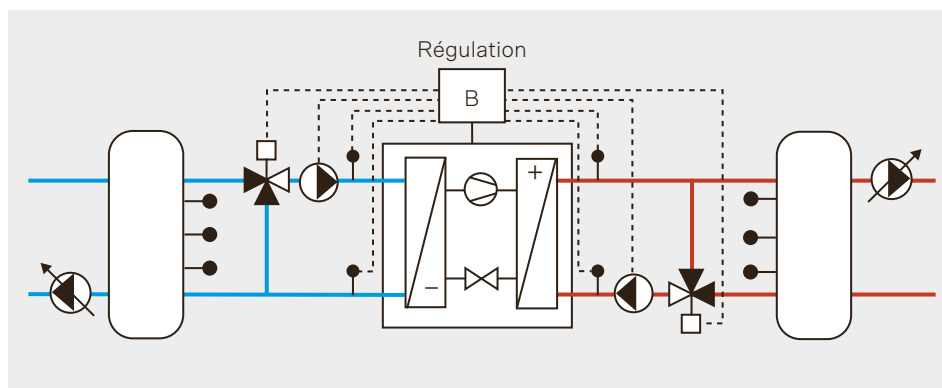


Illustration 9.4: Interfaces solution B: Machine frigorifique-thermique (MFT) avec mélange.

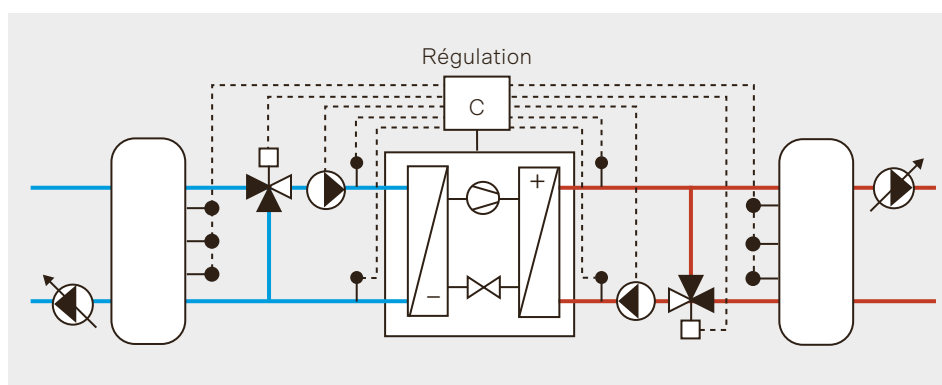


Illustration 9.5: Interfaces solution C: Machine frigorifique-thermique (MFT) jusqu'à et avec le chargement de l'accumulateur.



### 9.3 Régulation de la puissance de la machine frigorifique

La puissance d'une machine frigorifique peut être ajustée à quatre endroits:

#### 1. Intervention sur le compresseur

Par une dérivation des cylindres sur les compresseurs à pistons ou par la vanne à glissière sur les compresseurs à vis, la puissance du compresseur peut être ajustée sans modifier sa vitesse de rotation (voir Chap. 5).

#### 2. Intervention sur le moteur

Le moteur peut être équipé d'une régulation de la vitesse de rotation. En outre, il est possible d'utiliser un moteur à commutation de pôles (conception spéciale de moteur permettant de régler des vitesses différentes et fixes).

#### 3. Intervention dans le circuit des fluides frigorigènes

Le fabricant de la machine frigorifique peut concevoir le circuit de fluide frigorigène de différentes manières. Dans le passé, la solution rentable avec étranglement de l'aspiration et dérivation des gaz chauds était souvent mise en œuvre, en particulier pour les petits systèmes avec un seul poste frigorifique. Cependant, les machines frigorifiques dotées d'une commande de dérivation des gaz

chauds entraînent une nette détérioration de l'efficacité énergétique du système. Il est donc recommandé de ne pas utiliser de telles machines avec une commande de dérivation des gaz chauds.

Remarque: La régulation de la surchauffe des gaz d'aspiration n'a aucune influence sur la puissance. Il s'agit plutôt de s'assurer qu'aucun fluide frigorigène n'atteint le compresseur (voir Approfondissement à la page 166).

#### 4. Accumulateur d'énergie

L'accumulateur d'énergie peut être utilisé pour écrêter les pics de puissance dans l'installation frigorifique. De cette manière, il est possible de réduire la taille de la machine frigorifique, de diminuer la fréquence de commutation et de rendre le fonctionnement du système plus stable (voir Chap. 6).

Les planificateurs peuvent n'influencer que le dimensionnement de l'accumulateur d'énergie. La manière de réguler la production de froid incombe au fabricant de la machine frigorifique. Toutefois, le planificateur doit établir des spécifications correspondantes lors de la commande et du choix des machines.

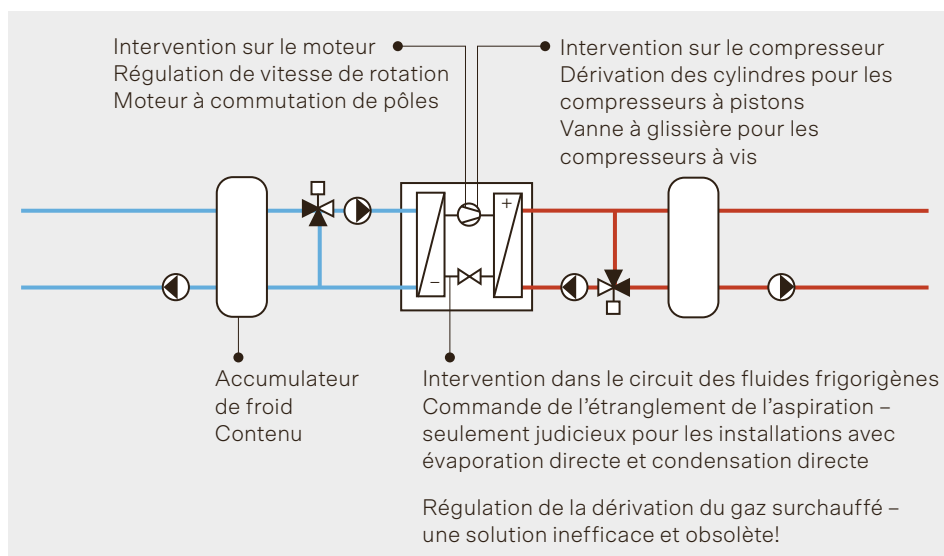


Illustration 9.6:  
Les quatre possibilités de réguler la puissance de la machine frigorifique.

## 9.4 Régulation du côté évaporateur

La puissance du compresseur est régulée en fonction de la température de sortie de l'évaporateur ( $T_{F-Sor}$ ). Si la valeur réelle de la  $T_{F-Sor}$  est supérieure à la valeur de consigne, la puissance du compresseur est augmentée et vice versa. Pour permettre à la régulation de la puissance du compresseur de réagir plus rapidement aux changements, la température d'entrée de l'évaporateur ( $T_{F-Ent}$ ) est souvent utilisée comme variable auxiliaire.

Le choix du mode de régulation dépend de l'écart admissible. Le suivi de la température s'effectue en ajustant la puissance du compresseur en continu (avec un CF) ou par paliers. (p. ex. une régulation à 4 étages pour l'eau glacée 14/8 °C, correspondant à une différence de 1,5 K par étage).

### Régulation de la température de sortie (côté évaporateur)

La régulation de la température à la sortie de l'évaporateur est principalement utilisée dans les systèmes avec régulation progressive de la puissance car il y a un contrôle rétroactif: après avoir modifié la spécification de la puissance du compresseur, la température de sortie de l'eau glacée ( $T_{F-Sor}$ ) change.

### Caractéristiques spécifiques

- Faible déviation de la régulation par rapport à la valeur de consigne<sup>1</sup>
- Sensible aux fluctuations de température à la sortie de l'évaporateur. En particulier pour les systèmes ayant une petite «capacité de stockage (de froid) de l'évaporateur».

### Commande de la puissance

Dans les installations avec commutation EN/HORS des compresseurs individuels, l'installation frigorifique est avantageusement contrôlée en fonction de la température d'entrée de l'évaporateur. Dans ce cas, le réseau hydraulique d'eau glacée – grâce à sa teneur en eau – a un effet d'amortissement. Par conséquent, le compresseur se met en marche et s'arrête moins souvent – ou a des périodes de fonctionnement et d'arrêt plus longues.

Avec une solution incluant une mesure de la température à la sortie de l'évaporateur, en revanche, la température chute immédiatement après la mise en marche d'un étage de compresseur – ce qui peut conduire au redémarrage de l'étage et ainsi augmenter la fréquence de commutation.

En option, il est possible de prévoir une limitation de la température de sortie. Caractéristiques spécifiques:

- Le réseau de froid a un effet d'amortissement

<sup>1</sup> Un régulateur PI (régulateur proportionnel-intégral) est utilisé à cet effet. Cela permet de régler exactement la valeur de consigne sans déviation de la régulation.

Illustration 9.7:  
Régulation de la température de sortie de l'évaporateur, compresseur avec régulation progressive de la puissance (20 à 100%).

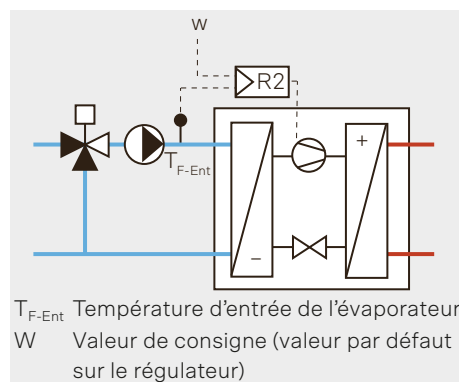
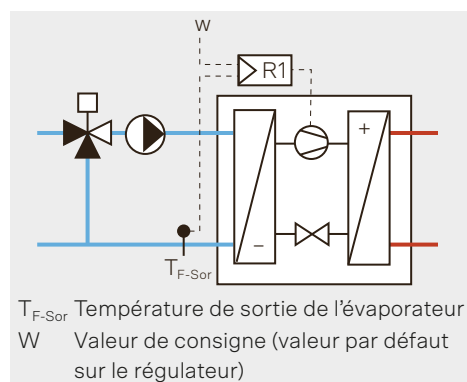


Illustration 9.8:  
Commande de la température d'entrée de l'évaporateur.

- Présente un plus grand écart de régulation, surtout si la différence entre les températures de condensation et d'évaporation est faible. Dans ce cas, la puissance du compresseur augmente, ce qui entraîne une plus grande différence de température par palier de puissance.

### Combinaison de la régulation de la température d'entrée et de sortie

Lorsqu'une régulation plus précise de la température de l'eau glacée est nécessaire pour les systèmes à forte demande, la régulation de la puissance peut être complétée par une modulation pour le maintien de la valeur de consigne.

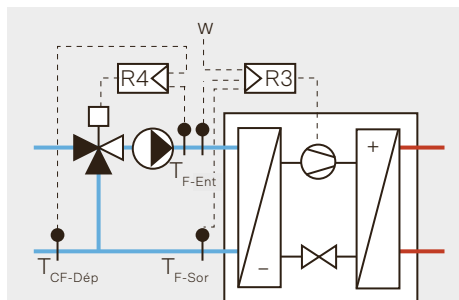
Dans ce cas, la puissance est régulée en fonction des températures de sortie et d'entrée de l'évaporateur. La limitation de la température d'entrée de l'évaporateur garantit le respect de la valeur de consigne. Lorsque cette valeur est dépassée dans le réseau, la vanne de mélange s'ouvre davantage en fonction de la limitation de la température d'entrée dans la position de déviation. Cela entraîne une baisse de la température de sortie de la machine frigorifique. Lorsque la valeur de consigne est atteinte, la

vanne est ouverte pleinement. Cette option permet de réduire les perturbations causées par le dépassement de la température de consigne dans le réseau. Elle est complétée par une régulation permettant de limiter la température d'entrée de l'évaporateur.

### Remarque relative au côté évaporateur

Le circuit de mélange (vanne à 3 voies) est recommandé pour le système avec accumulateur et pour les installations où la température souhaitée de sortie de l'évaporateur doit être maintenue à tout moment. Cela s'applique également au démarrage de la machine frigorifique lorsque la température du réseau est élevée (p.ex. après le week-end). L'installation du circuit de mélange entraîne toutefois des coûts supplémentaires.

Comme alternative un peu moins coûteuse, il est possible de réduire le débit volumique à une température d'entrée élevée de l'évaporateur au moyen d'une pompe à vitesse contrôlée afin d'obtenir le même effet. Toutefois, cette variante ne peut être réalisée qu'avec l'accord du fournisseur de la machine. Ces considérations s'appliquent également au côté condenseur.



- R3 Régule la puissance en fonction de la température d'entrée et de sortie de l'évaporateur.
- R4 Régulateur pour la limitation de température
- $T_{F-Sor}$  Température de sortie de l'évaporateur
- $T_{F-Ent}$  Température d'entrée de l'évaporateur
- $T_{CF-Dép}$  Limitation de la température de sortie vers le réseau d'eau froide
- W Valeur de consigne (valeur par défaut sur le régulateur)

Illustration 9.9:  
Combinaison de la régulation de la température d'entrée et de sortie.

### Limitation de la température maximale à l'entrée de l'évaporateur (R4)

La limitation maximale permet d'éviter des températures de sortie trop élevées à la sortie de l'évaporateur ainsi que d'éventuels dysfonctionnements lors du démarrage de la machine frigorifique. Il faut clarifier avec le fournisseur de la machine frigorifique quelle est la température maximale admissible de l'entrée d'eau de l'évaporateur et pendant combien de temps elle peut être dépassée. Cette limitation est particulièrement nécessaire pour:

- Circuit de l'accumulateur, afin qu'il soit chargé à une température régulière.
- Installations avec une grande quantité d'eau glacée: le problème se pose ici lors du démarrage de l'installation avec des températures moyennes élevées (20 à 25 °C) après un arrêt prolongé.

### Décalage de la valeur de consigne après l'augmentation de la température de sortie de l'évaporateur

Lorsque la température de sortie de l'évaporateur est augmentée, par exemple de 2 K, les valeurs de consigne pour la température d'entrée de l'évaporateur et du condenseur, ainsi que diverses autres valeurs – telles que les températures de stockage dans le régulateur de niveau supérieur – doivent également être augmentées simultanément de 2 K.

Il est donc judicieux de fonctionner avec un  $\Delta T$  à la valeur de base définie dans chaque cas et d'y associer toutes les autres valeurs de consigne. La mise en œuvre de cette option dans la phase de planification n'entraîne qu'un surcoût minime. En revanche, une adaptation ultérieure du logiciel sera plus coûteuse.

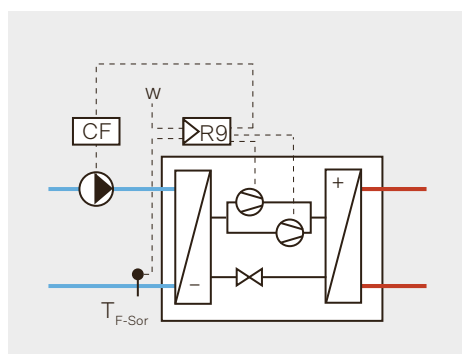
### Remarque relative à la commande des pompes

La pompe et la surveillance de la température de l'évaporateur sont réglées de manière à fonctionner après l'arrêt du compresseur et à évacuer le «froid résiduel» (cela s'applique surtout aux évaporateurs noyés).

### Régulation de la puissance en combinaison avec un débit volumique variable

En cas d'utilisation d'une pompe à vitesse de rotation réglée du côté de l'évaporateur, plusieurs variantes de combinaison sont possibles. Deux exemples sont donnés ci-dessous:

Illustration 9.10: Régulation assurant une température de sortie constante ( $T_{F-Sor}$ ). Afin de maintenir la température de sortie constante, on règle d'abord la puissance du compresseur, puis le débit volumique en séquence (l'un après l'autre), si le fournisseur de froid le permet (R9).



### Exemple 1: Régulation séquentielle de la puissance de la machine frigorifique par le biais du débit volumique.

Pour les systèmes avec des débits volumiques variables via l'évaporateur, il faut respecter les spécifications des fabricants. La plupart d'entre eux n'autorisent qu'une réduction maximale du débit volumique de 30 %. Cela est dû au fait que le transfert de chaleur dans les échangeurs à plaques change avec un débit volumique considérablement réduit. Il en résulte des conditions de fonctionnement incontrôlables.

### Exemple 2: Débit volumique «consigne»: fixé par le système de niveau supérieur

La régulation de niveau supérieur (p. ex. la gestion technique du bâtiment) spécifie le débit volumique en fonction des conditions hydrauliques et du besoin de puissance ( $V_{GTB}$ ). En outre, le débit volumique est réduit lorsque la température de sortie de consigne ( $T_{F-Sor}$ ) est dépassée.

Dans la pratique, il a été démontré que la gestion technique du bâtiment (GTB) devrait idéalement signaler uniquement le besoin à la machine frigorifique. Il faut éviter que la GTB intervienne directement dans la régulation de la machine (p. ex. en spécifiant la puissance de refroidissement requise). La machine doit toujours s'autoréguler.

Le système décrit ci-dessus – en particulier la spécification par la GTB – doit donc être bien pris en compte afin d'éviter les problèmes lors de l'exploitation de l'installation. Cette solution impose des exigences plus élevées tant au planificateur qu'à l'installateur.

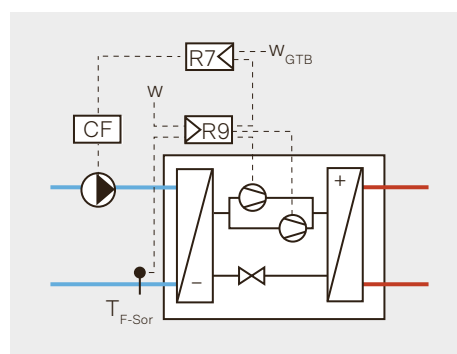


Illustration 9.11: Régulation de la température de sortie combinée au point de consigne de l'automatisation du bâtiment (R9).

## 9.5 Régulation du côté du condenseur

La température de condensation est déterminée ou par le post-refroidissement ou par l'utilisation de la chaleur. Il est conseillé de prévoir la possibilité de décaler la température de sortie de la condensation – même si cela ne semble pas nécessaire dans la phase de planification.

Il est donc logique de travailler dans chaque cas avec une différence de température ( $\Delta T$ ) par rapport à la valeur de base spécifique et d'y associer toutes les autres valeurs de consigne. La mise en œuvre de cette option dans la phase de planification entraîne un coût supplémentaire minime. En revanche, une adaptation ultérieure du logiciel est très coûteuse.

**Remarque:** Au lieu de la température, la pression peut également être utilisée comme variable contrôlée.

### Limitation de la température minimale à l'entrée du condenseur (R5)

La limitation de la température minimale à l'entrée du condenseur empêche que celle-ci soit trop basse. Une différence minimale doit être assurée entre la température de condensation  $T_c$  et la température d'évaporation  $T_0$ .

La différence de température minimale ( $T_c - T_0$ ) doit être clarifiée avec le fournisseur de la machine. Elle est souvent de 12 à 15 K, dans des cas exceptionnels environ 10 K. Cela signifie que lorsque la température de sortie de l'évaporateur est élevée, la température d'entrée du condenseur doit être augmentée en conséquence.

### Interaction entre la machine frigorifique et l'aéroréfrigérant

La séparation structurelle et fonctionnelle de la machine frigorifique et de l'aéroréfrigérant nécessite deux boucles de régulation pour évacuer la chaleur via ce dernier (Illustr. 9.12). Une boucle de régulation (R5) veille à ce que la température d'entrée du condenseur ne soit pas trop basse (limitation minimale de la température d'entrée du condenseur). L'autre

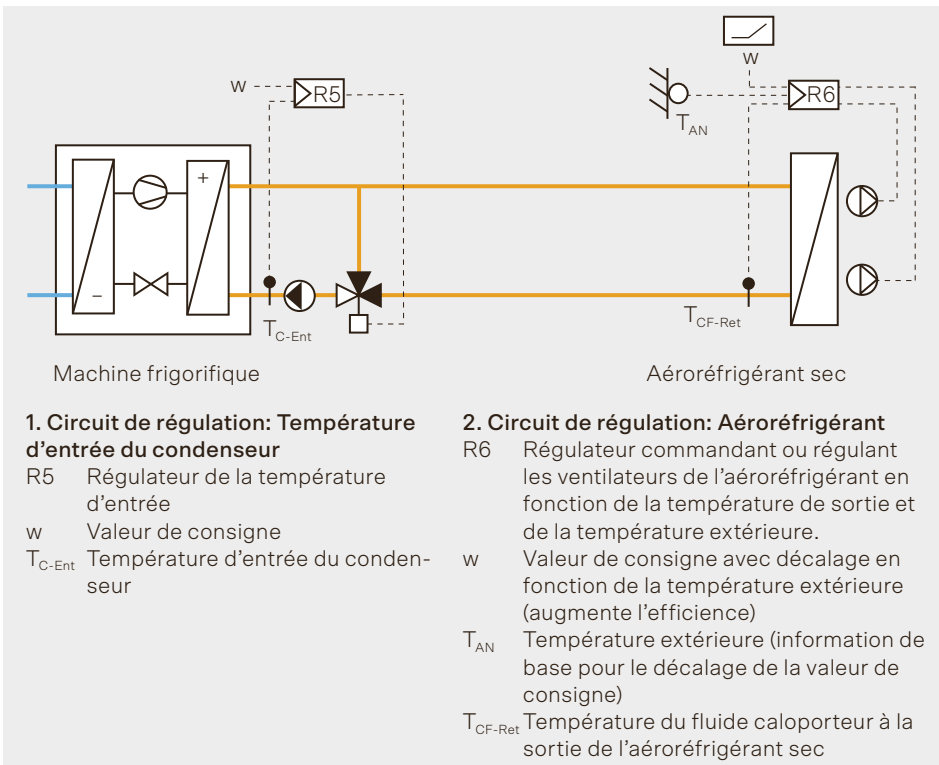


Illustration 9.12: Intégration de la régulation d'un aéroréfrigérant sec. Dans ce cas, le condenseur de la machine frigorifique est traversé par un débit volumique constant et la température d'entrée est régulée.

circuit de régulation (R6) régule la température de sortie de l'aéroréfrigérant en fonction de la température extérieure et assure ainsi une évacuation efficace de la chaleur.

Au lieu des régulations de mélange, le débit variable peut également être utilisé pour les machines ne fonctionnant qu'en été (pas de fonctionnement en hiver) (option lors de l'utilisation d'échangeurs de chaleur à plaques, Illustr. 9.13).

### Remarques relatives au côté condenseur

- Pour qu'une installation frigorifique seule, sans récupération de chaleur, fonctionne de manière efficace sur le plan énergétique, il est absolument nécessaire de décaler la valeur de consigne de la pression de condensation en fonction de la température extérieure.
- En particulier, pour la récupération de chaleur, la température d'entrée dans le condenseur doit correspondre à la température de dimensionnement (important surtout avec l'utilisation d'un accumulateur).
- Prévoir le cycle d'arrêt de la pompe du condenseur.
- Pour les circuits de post-refroidissement ouverts, il est recommandé de surveiller la différence de température entre la condensation et la sortie du condenseur. Sur la base de la différence de température, il est possible de déterminer si le condenseur est encrassé.

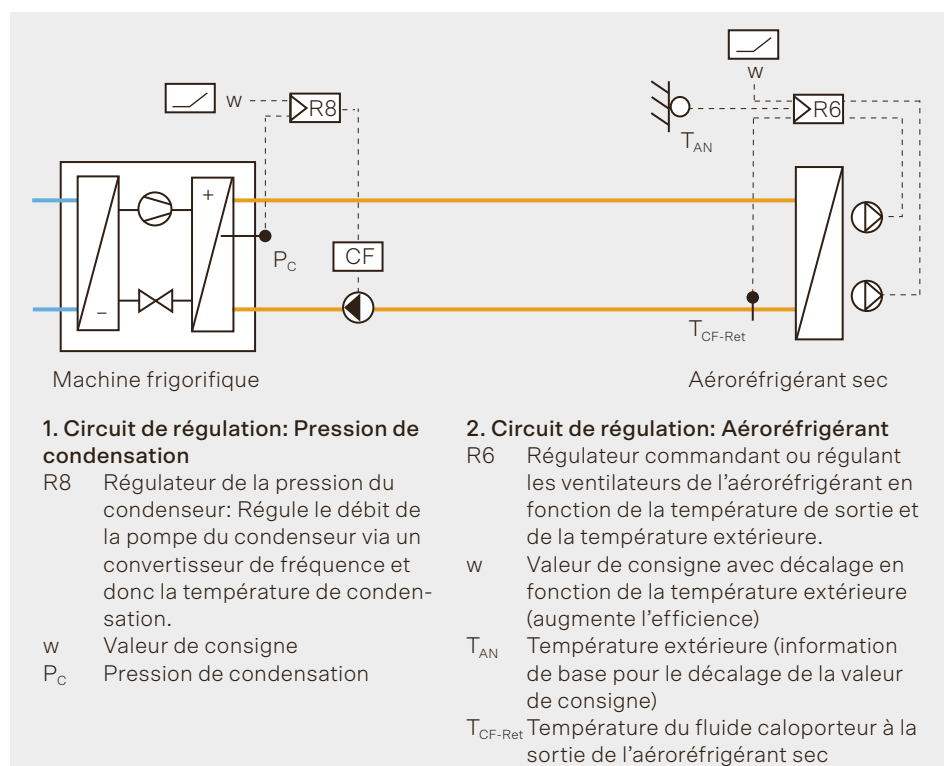


Illustration 9.13: Schéma de régulation où la pression de condensation (température de condensation) est régulée avec un débit volumique variable. Pour les machines frigorifiques fonctionnant uniquement en été.

## 9.6 Mise en marche et arrêt de la machine frigorifique

Les machines frigorifiques ne peuvent fonctionner que dans certaines conditions de température. Ainsi, la température au niveau de l'évaporateur ne doit pas dépasser ou descendre en dessous d'une certaine valeur (p.ex. 4 à 20 °C). Simultanément, une température minimale doit régner au niveau du condenseur (p.ex. au moins 25 °C).

Pour que ces conditions puissent être respectées lors du démarrage de la machine frigorifique et pendant son fonctionnement, ses températures sont réglées et assurées des deux côtés par des circuits de mélange (limitations de température). Une limitation peut être nécessaire en fonction des températures requises pour un processus.

### Mise en marche et arrêt d'une machine frigorifique

La durée du démarrage ou de l'arrêt d'une machine frigorifique dépend de sa marque. Pour le démarrage, la fourchette se situe généralement entre 2 et 20 minutes. Cet aspect est important pour la régulation de l'installation et doit être pris en compte lors du dimensionnement de l'accumulateur. Pour les installations dont le temps de démarrage est long, l'accumulateur doit disposer de réserves suffisantes.

Le processus d'arrêt est analogue, mais généralement beaucoup plus court. Pour la pompe de l'évaporateur et celle du condenseur, il est recommandé d'effectuer un cycle d'arrêt temporisé après l'arrêt de la machine frigorifique. Le raccordement séquentiel de plusieurs machines frigorifiques est décrit dans le Chapitre «Systèmes hydrauliques».

Il faut tenir compte du fait qu'avec un besoin de puissance frigorifique réduit, le compresseur ne peut pas être mis en marche et arrêté aussi souvent que souhaité. Le verrouillage du redémarrage du moteur du compresseur ne permet qu'un certain nombre de démarrages, généralement de 3 à 6 en une heure. Moins il y a de démarrages, mieux c'est. Lorsque le verrouillage est actif, la machine frigorifique fournira une puissance réduite dans les systèmes à compresseurs multiples ou aucune puissance dans les systèmes à un seul compresseur. Ceci est important pour la régulation de l'installation et doit être pris en compte lors du dimensionnement de l'accumulateur. Chaque démarrage ou arrêt de la machine frigorifique est également associé à une réduction de l'efficacité énergétique de la machine – plus d'énergie est nécessaire au démarrage que pendant le fonctionnement. Il faut donc viser le moins de démarrages et d'arrêts possible.

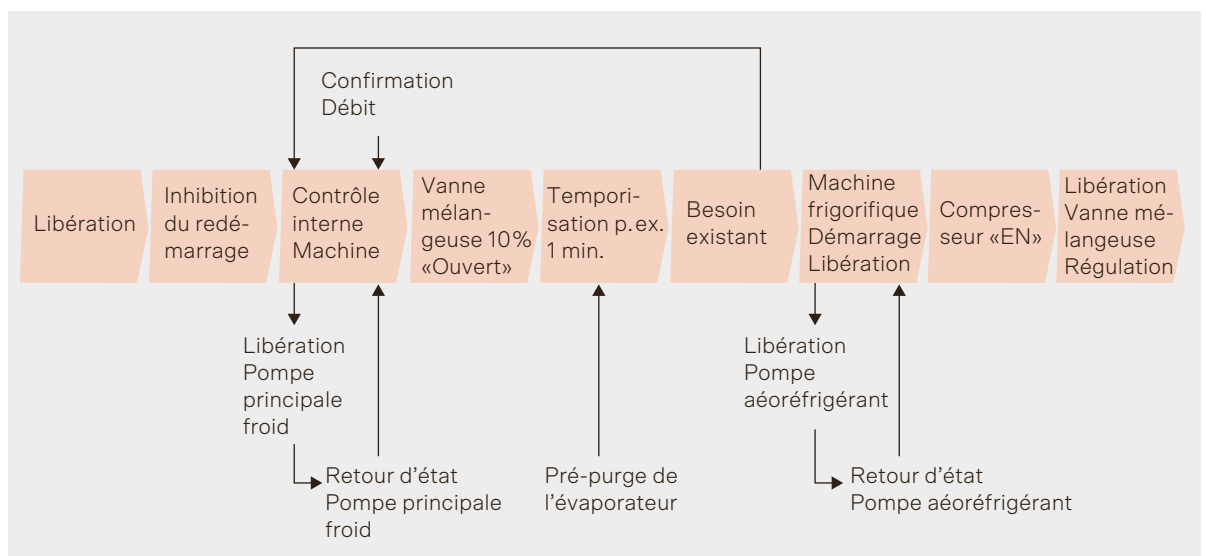


Illustration 9.14:  
Procédure de démarrage d'une machine frigorifique.





## 9.7 Sécurité des machines frigorifiques

Une machine frigorifique est protégée contre les dommages éventuels par divers dispositifs de sécurité. En particulier, si la chaleur ne peut plus être évacuée du côté du condenseur ou si les températures du côté de l'évaporateur deviennent basses au point de geler le frigoroporteur, les dispositifs de sécurité doivent réagir rapidement et arrêter la machine ou, dans les cas extrêmes, purger le fluide frigorigène. Sinon, il y a risque d'éclatement des composants et des conduites. Les variables essentielles sont résumées dans l'illustration 9.17.

### Protection de l'évaporateur contre le gel

Pour les installations de climatisation, les températures inférieures à 8 °C à la sortie de l'évaporateur sont basses. Lorsqu'un frigoroporteur sans antigel est utilisé à ces températures, le risque de gel augmente. La raison en est que la température de l'évaporateur du fluide frigorigène peut également descendre bien en dessous de 0 °C à des fins de régulation. Il faut donc prendre les mesures suivantes pour se protéger:

- La machine frigorifique ne démarre qu'après la libération de la protection du moteur de la pompe de l'évaporateur.
- Surveillance du débit: dans cet exemple, elle s'effectue via la surveillance de la pression différentielle (voir

le contrôleur de débit PIC<sup>2</sup> 9.17). La surveillance peut également se faire à l'aide d'un débitmètre thermique<sup>3</sup> ou d'un contrôleur à palettes. La dernière variante n'est pas recommandée en raison de sa sensibilité aux interférences.

- Arrêt du compresseur en raison d'une température de sortie trop basse.
- Surveillance de la pression de l'évaporateur avec un pressostat basse pression.

**2** PIC = Pressure Indicator + Controller = Indicateur et contrôleur de pression

**3** Un débitmètre thermique (débitmètre calorimétrique) mesure le débit électroniquement.

Ce principe de mesure est utilisé pour la surveillance et la mesure du débit.

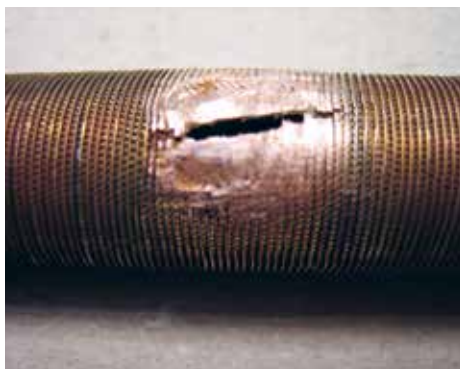


Illustration 9.15:  
Rupture d'un tuyau  
due à un circuit  
d'évaporateur gelé  
(dommages dus au  
gel).



Illustration 9.16:  
La surveillance du  
débit volumique à  
l'aide de la surveil-  
lance de la pression  
différentielle peut  
être utilisée pour  
mesurer le flux à tra-  
vers l'évaporateur et  
ainsi le protéger du  
gel. La différence de  
pression s'affiche si-  
multanément.

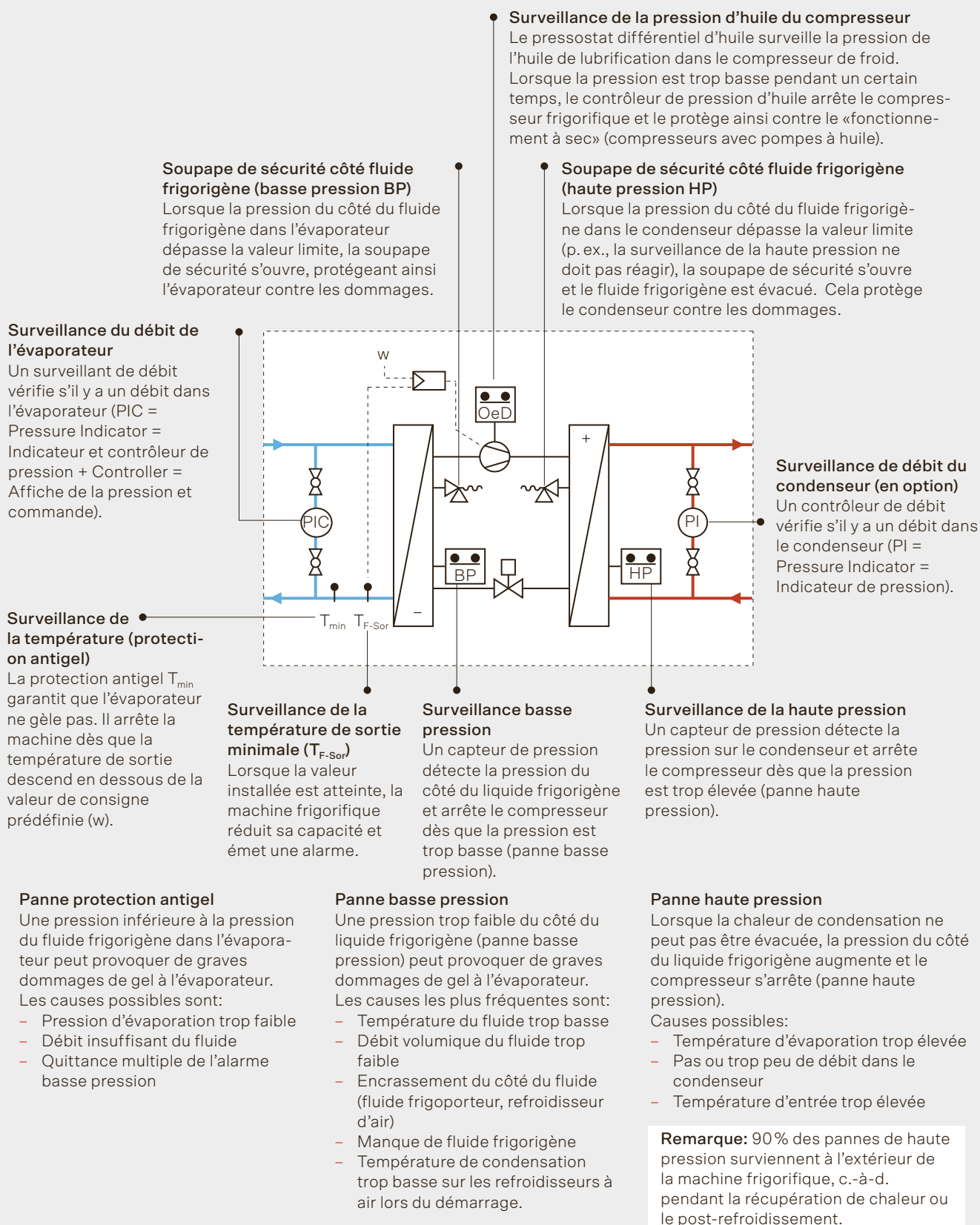


Illustration 9.17: Variables de régulation et de commande pertinentes pour la sécurité des machines frigorifiques.

## Approfondissement

### Régulation de la surchauffe des gaz d'aspiration

Pour éviter d'endommager le compresseur, celui-ci ne doit pas aspirer de fluide frigorigène sous forme liquide. Cela peut provoquer des coups de liquide sur le compresseur et l'abîmer. Pour éviter que du fluide frigorigène liquide ne pénètre dans le compresseur, une surchauffe appropriée des gaz d'aspiration en garantit l'évaporation complète.

En fonction de la température dans la conduite d'aspiration et de la pression d'évaporation, il est possible de déterminer si tout le fluide frigorigène s'est évaporé.

Lorsque le fluide frigorigène est plus chaud que nécessaire pour une évaporation complète, les experts en refroidissement parlent de surchauffe des gaz d'aspiration. Plus cette surchauffe est faible, plus la machine frigorifique est énergétiquement efficace. Simultanément, les petites surchauffes représentent également un risque, car le système doit alors réagir très rapidement aux changements.

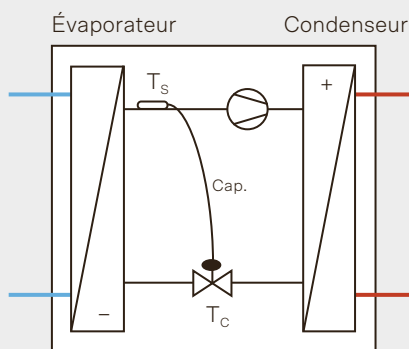
#### Détendeur thermostatique

Dans les détendeurs thermostatiques, une variation de température au niveau de la sonde entraîne une variation de pression dans le tube capillaire. Celle-ci est transmise à une membrane agissant sur l'obturateur de la vanne. Cela ouvre plus ou moins le détendeur. Le détendeur thermostatique se comporte comme un régulateur P et la surchauffe est – par rapport au détendeur électronique – plus importante.

#### Détendeur électronique (DE)

Avec un détendeur électronique (DE), le régulateur de surchauffe contrôle la différence de température entre la température des gaz d'aspiration et la température d'évaporation calculée. Grâce à une électronique précise, la vanne d'injection peut être contrôlée dans une plage étroite. Cela permet une meilleure utilisation des températures (moins de réserve = plus d'efficacité énergétique).

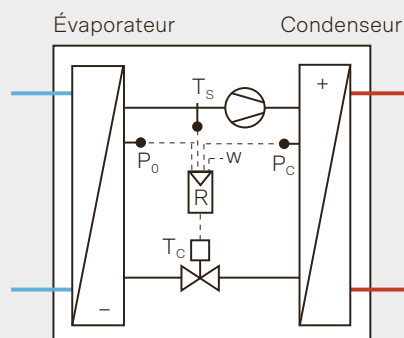
Illustration 9.18:  
Régulation de la surchauffe du gaz d'aspiration avec un détendeur thermostatique.



$T_s$  Température du gaz aspiré  
Cap. Tube capillaire  
 $T_c$  Détendeur (régulation de la température du gaz aspiré)

La fonction d'un détendeur thermostatique est similaire à celle d'un robinet thermostatique de radiateur avec sonde à distance.

Illustration 9.19:  
Régulation de la surchauffe du gaz d'aspiration avec un détendeur électronique DE.



R Régulateur de la surchauffe du gaz d'aspiration  
 $T_c$  Détendeur (régulation de la température du gaz aspiré)  
 $P_c$  Pression de condensation  
 $P_0$  Pression d'évaporation  
 $T_s$  Température du gaz aspiré  
V Valeur de consigne

## 9.8 Vannes de régulation et sondes

### Installation des vannes de régulation

Les vannes doivent être installées aussi près que possible de l'évaporateur ou du condenseur. En effet, une trop grande distance entraîne un temps mort plus long et rend la régulation stable plus difficile. Il en résulte une régulation instable avec des températures de fonctionnement fluctuantes.

### Sélection et installation des sondes

Dans la technologie du froid, il faut utiliser des sondes aussi rapides que possible et ayant une faible constante de temps. Les sondes en contact direct avec l'eau glacée réagissent plus rapidement et plus précisément que ceux qui sont dans des douilles plongieuses. Les

sondes qui ne sont pas insérées dans les doigts de gants sont plus difficiles à remplacer ou à étalonner.

Lorsque les sondes sont installées dans des doigts de gant, elles doivent toujours être recouvertes d'une pâte thermique. Ce n'est que de cette manière qu'ils fourniront des résultats de mesure suffisamment précis.

Lorsque des sondes mal placées doivent être déplacées, cela prend du temps et coûte cher.

### Placement des sondes

Des sondes mal positionnées en aval de la vanne de mélange peuvent mesurer des températures faussées ou fluctuantes. Cela entraîne une fluctuation des températures à l'entrée de l'évaporateur. En conséquence, la régulation de la machine frigorifique devient instable.

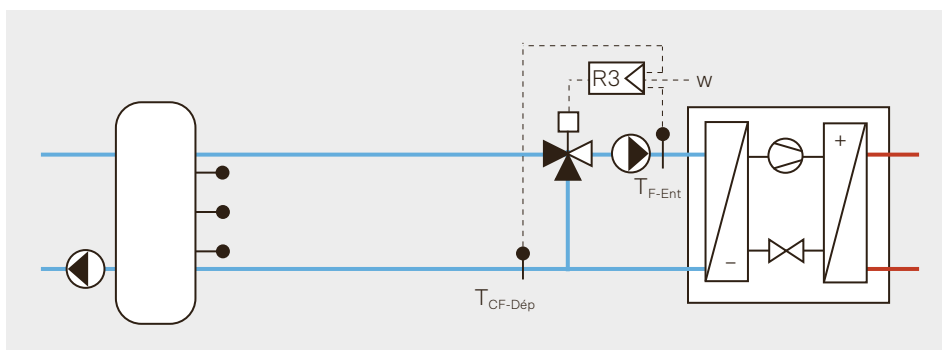
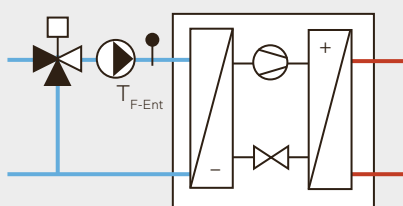


Illustration 9.20: Lorsque la pompe de l'évaporateur et la vanne de régulation sont installées à proximité de l'évaporateur, le système de régulation réagit rapidement.

#### A: Après la pompe

Sonde ( $T_{F-Ent}$ ) correctement placée après la pompe du condenseur. Ici, les flux d'eau se sont généralement mélangés et les températures sont «correctes».



#### B: Après la vanne

La sonde ne doit être placée après la vanne et avant la pompe que s'il n'y a vraiment pas d'autre moyen. Dans ce cas, la sonde doit être placée à une distance minimale ( $d$ ) de 10 fois le diamètre du tuyau – et à au moins 50 cm de la vanne. Sinon, en fonction de la position de la vanne, des mélanges hétérogènes peuvent entraîner une mesure incorrecte de la température.

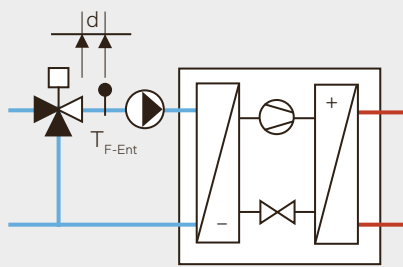


Illustration 9.21: Placement de la vanne.

Les sondes de température des circuits de mélange peuvent être placées comme indiqué sur l'illustration 9.21:

En plaçant la sonde après la vanne, on mesure des températures différentes selon la position de la vanne. Par conséquent, la température à l'entrée de la machine est soumise à de fortes fluctuations. En conséquence, la régulation de la machine frigorifique devient instable. Voir également le Chapitre «Systèmes hydrauliques».



Illustration 9.22:  
Sonde mal placée,  
immédiatement  
après la vanne mé-  
langeuse et avant la  
pompe. Le déplace-  
ment du capteur  
après la mise en ser-  
vice du système  
prend du temps.

## 9.9 Exemples de combinaison de régulations

La régulation globale du système de climatisation et de réfrigération est constituée à partir des boucles de régulation décrites.

Deux exemples d'une combinaison possible – convenant aux installations présentant une courte distance entre le condenseur et l'aéroréfrigérant – sont présentés ci-dessous:

### Exemple de combinaison A

- R3 Régulation de la puissance de refroidissement
- R4 Limitation maximale de la régulation de la température d'entrée de l'évaporateur
- R5 Limitation minimale de la régulation de la température d'entrée du condenseur
- R6 Régulation de la température de sortie de l'aéroréfrigérant avec décalage du point de consigne en fonction de la température extérieure

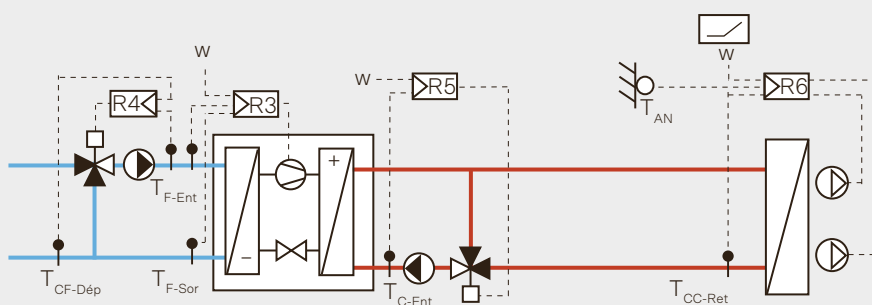


Illustration 9.23: Régulation globale d'une installation frigorifique avec circuits de mélange.

### Exemple de combinaison B pour les machines frigorifiques ne fonctionnant qu'en été

- R6 Régulation de la température de sortie de l'aéroréfrigérant avec décalage du point de consigne en fonction de la température extérieure
- R7 Régulation de la vitesse de rotation des pompes
- R8 Régulation de la pression de condensation par pompe à vitesse de rotation variable
- R9 Régulation séquentielle de la puissance de la machine frigorifique par le débit volumique

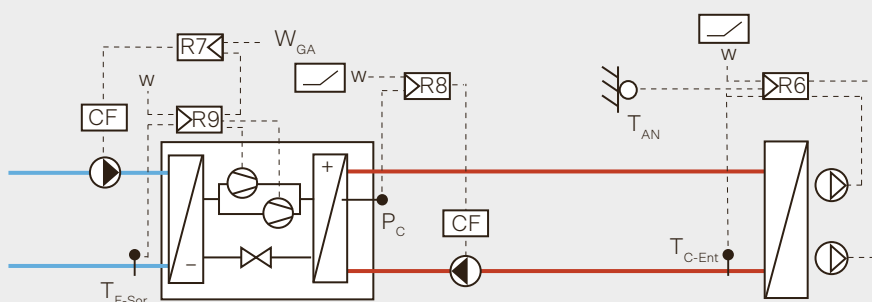


Illustration 9.24: Régulation d'une installation frigorifique avec débits volumiques variables.

## 9.10 Monitoring de l'exploitation

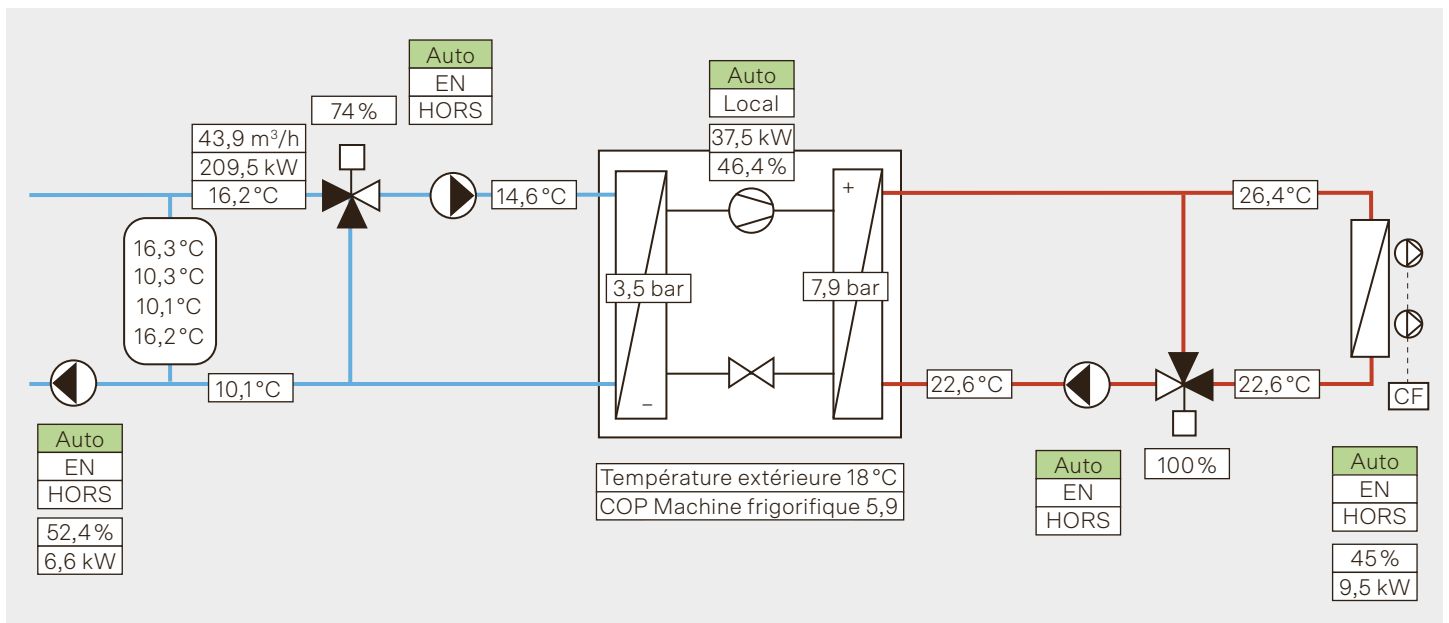
Pour garantir le fonctionnement optimal d'une installation frigorifique et faciliter son utilisation par le personnel d'exploitation, il est judicieux de visualiser les données de fonctionnement les plus importantes ainsi que l'efficacité énergétique du système et de stocker ces données. Lorsque les données relatives à la puissance frigorifique générée et au besoin de puissance de la machine frigorifique sont disponibles, il est logique d'afficher en permanence le coefficient de performance de la machine frigorifique. Étant donné que l'efficacité énergétique de l'installation dépend principalement de la puissance de la machine frigorifique et de la température extérieure, ces valeurs doivent également être visualisées afin de pouvoir mieux interpréter le coefficient de performance affiché. Cela offre de bonnes conditions pour une optimisation continue de l'installation en termes d'efficacité énergétique.

capacité énergétique de chaque machine frigorifique en fonction de la température extérieure.

Pour l'exploitant, il est important que quelqu'un vérifie régulièrement les données et puisse également interpréter les valeurs affichées. Ce n'est que de cette manière qu'une telle visualisation (pas tout à fait bon marché) peut être utile. L'illustration 9.25 présente une visualisation d'un système de gestion technique des bâtiments (GTB) avec une surveillance continue de l'efficacité énergétique.

Illustration 9.25:  
Visualisation de la consommation d'une plus grande machine frigorifique.

Le nombre de données enregistrées dépend de la taille de l'installation. Ces données peuvent être utilisées pour créer des graphiques de la consommation d'énergie et de la production de froid dans le temps, ainsi que la courbe d'effi-



## 10 points relatifs à la commande des installations de climatisation

1. Aux interfaces entre la machine frigorifique, les consommateurs de froid, les consommateurs de chaleur et les techniques du bâtiment CVC, il faut définir quelles données et quels signaux sont nécessaires.
2. L'installation (machine frigorifique, utilisation de la chaleur, post-refroidissement etc.) doit être considéré comme un système global. La régulation et la commande de la machine frigorifique doivent être intégrées dans la régulation et la commande de l'ensemble du système.
3. La régulation et la commande ont une influence importante sur l'efficacité énergétique de l'ensemble de l'installation.
4. La machine frigorifique ne peut être utilisée que dans certaines plages de température. La régulation doit garantir que la machine frigorifique fonctionne dans cette plage. Lorsque la régulation n'est pas conforme à la plage de température, la machine frigorifique ne peut pas démarrer.
5. Les dispositifs de commande, de régulation, de sécurité et les systèmes hydrauliques (pompes et vannes) font également partie de la production de froid.
6. Plus la production de froid peut être adaptée précisément au besoin effectif, plus l'installation est efficace.
7. Les trois principales régulations de la machine frigorifique sont:
  - Régulation tout ou rien (0 et 100 %),
  - Régulation par paliers (0, 25, 50, 75 et 100 %) ou
  - Régulation progressive (20 à 100 %) avec un convertisseur de fréquence (CF)
8. La plupart des systèmes fonctionnent lorsque le besoin de froid correspond à 100 % du dimensionnement. Il faut vérifier le comportement du système de refroidissement lorsque celui-ci se situe entre 0 et 50 % de la puissance nominale.
9. La régulation ne peut pas compenser les défauts hydrauliques et autres.
10. L'installation doit être utilisée dans ses limites d'application lors de températures exceptionnelles (hiver et entre-saison: gel, été: chaleur tropicale). Dans ces situations extrêmes, il vaut mieux que le système fonctionne de manière «réduite» plutôt que d'être confronté à une panne totale. De cette façon, les valeurs garanties ne sont plus atteintes, mais le refroidissement de base a quand même lieu.





# Efficacité énergétique et comportement à charge partielle

**Le fonctionnement énergétiquement optimal des installations de climatisation est un objectif important des travaux de planification technique. Le planificateur doit comprendre les chiffres clés – tels que le COP et l'EER – car ils permettent l'expression de l'efficacité des composants et de l'installation globale. Outre le choix du système, les conditions de fonctionnement et l'utilisation simultanée du refroidissement et du chauffage doivent également être prises en compte dans la planification. Pour ce faire, il est nécessaire de regarder au-delà du refroidissement, vers le système global.**

## 10.1 Comprendre l'efficacité du système

L'évaluation de l'efficacité énergétique d'un système de climatisation et de réfrigération est complexe. Il faut évaluer un système composé de nombreux éléments hétérogènes qui interagissent différemment en fonctionnement «réel» (à charge partielle) et à leur pleine charge nominale. En outre, des indicateurs d'efficacité peuvent être définis pour des composants individuels, par exemple uniquement pour la machine frigorifique. D'autre part, ils peuvent également être définis pour un système global, tel que la machine frigorifique-thermique, qui comprend l'exploitation de la chaleur. Il est donc essentiel que tous les chiffres clés indiquent clairement ce qu'ils recouvrent (limites du système).

### Aperçu de l'efficacité globale

L'objectif est toujours d'obtenir un système global optimisé. Il peut être judicieux, par exemple, d'augmenter la température de condensation et de rendre ainsi le processus de refroidissement plus inefficace. C'est le cas lorsque la chaleur peut être entièrement exploitée, ce qui permet d'obtenir un système global

très efficient (voir Chap. 7.1). Par conséquent, il faut toujours optimiser le bâtiment dans son ensemble (éventuellement aussi pour une zone ou un quartier) et pas «seulement» sur un composant individuel.

### Le fonctionnement en charge partielle est décisif

L'efficacité du système global est évaluée dans une première étape pour un point fixe dans le temps (généralement à charge maximale). Cependant, les systèmes de climatisation ne fonctionnent généralement à pleine charge que quelques jours par an – la plupart du temps, ils travaillent à charge partielle. Par conséquent, il est peu judicieux de concevoir le système pour obtenir une efficacité énergétique optimale à pleine charge (100 %). Il s'agit plutôt d'un fonctionnement à charge partielle dans lequel l'installation de climatisation doit travailler de manière très efficace.

**En moyenne, une installation de climatisation fonctionne à moins de 50 % de sa puissance pendant 60 % de son temps de fonctionnement annuel.**

Il est intéressant d'évaluer le comportement et l'efficacité énergétique des installations non seulement à pleine charge

### L'efficacité énergétique est un état d'esprit

De la planification à la construction, en passant par la mise en service et l'exploitation: l'efficacité énergétique est toujours un enjeu et doit donc être poursuivie de manière ciblée dans le processus de travail quotidien. Il n'est pas opportun de penser brièvement à l'efficacité énergétique de l'installation de climatisation après l'achèvement des travaux.

L'énergie et l'efficacité sont abordées dans tous les chapitres précédents.

mais aussi à 25, 50 et 75% de charge. Grâce à diverses options de commande, p.ex. le fonctionnement avec un convertisseur de fréquence ou l'ajout d'étages de puissance, avec des accumulateurs supplémentaires ou l'utilisation de la chaleur, l'efficacité de l'ensemble de l'installation peut être considérablement améliorée sur toute la plage de charge.

## 10.2 Bilan énergétique d'un système de climatisation

Le bilan énergétique d'une installation frigorifique peut être réalisé selon différentes limites du système. La loi sur l'énergie exige qu'en plus de la machine frigorifique, la puissance des pompes de circulation dans les conduites caloporteurs et de frigoporteurs, des entraînements de ventilateurs dans les aérorefrigérants, etc. soit également incluse dans le calcul. L'illustration 10.1 montre un exemple de répartition d'une machine frigorifique en systèmes partiels. Chaque système partiel contribue à l'efficacité globale de l'installation. Bien que la machine frigorifique soit un composant important du point de vue de l'efficacité, l'efficacité énergétique globale du système est déterminante pour l'exploitant. Par exemple, les dysfonctionnements des vannes peuvent entraîner un fonctionnement inefficace, même si la machine frigorifique fonctionne de manière optimale. En outre, il faut veiller à ce que les températures pour le côté

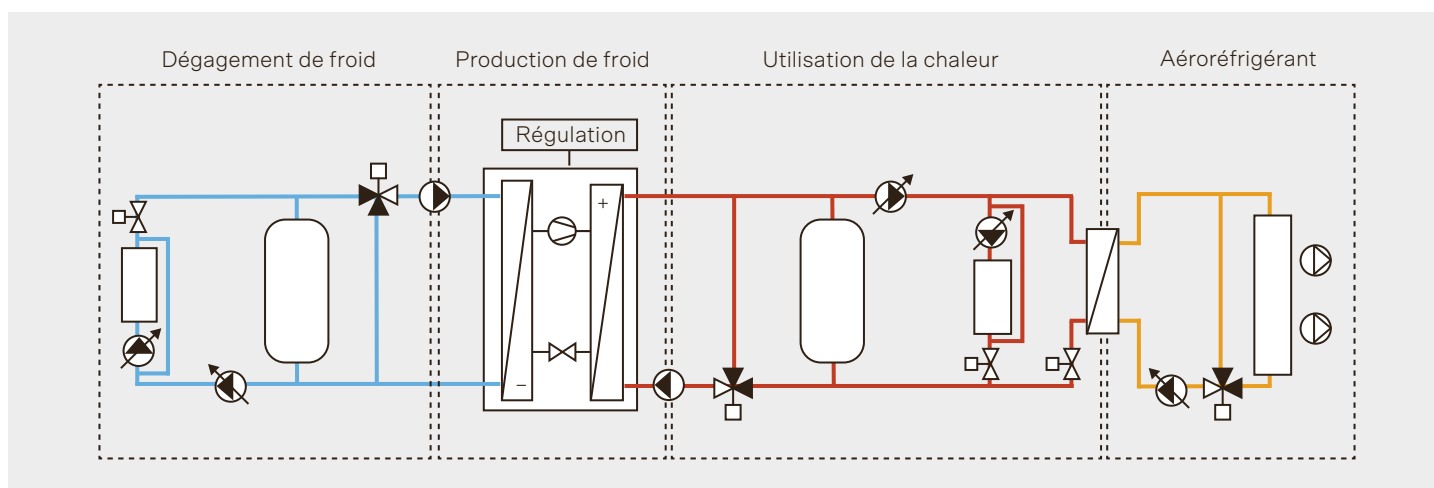
froid et pour le côté chaud soient orientées vers les consommateurs de chaleur et de froid respectifs.

La spécification des coefficients de performance doit être conforme à la norme SIA 382/1 (2014) ou Eurovent. Pour les systèmes compacts, les consommateurs électriques à l'intérieur de l'installation sont ajoutés aux dépenses.

La mesure de l'énergie des installations frigorifiques est souvent effectuée dans des «conditions difficiles», car les composants sont largement dispersés dans le bâtiment. Dans les systèmes plus importants, il est assez courant d'avoir un aérorefrigérant séparé sur la toiture, qui est relié à la machine frigorifique en sous-sol par un réseau hydraulique. C'est une nette différence par rapport aux pompes à chaleur, qui sont souvent plus compactes. Il est donc nécessaire d'ajouter soigneusement les flux d'énergie partiels concernés.

Les pertes de chaleur dues à l'évacuation de la chaleur du côté chaud à l'extérieur de l'échangeur de chaleur sont, selon l'expérience, inférieures à 3% de ( $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$ ) et sont négligées ici.

Illustration 10.1:  
Exemple de la division d'une machine frigorifique en systèmes partiels.



### 10.3 Évaluation énergétique des installations de climatisation

Avec l'«Outil du froid», SuisseEnergie fournit un outil en ligne gratuit pour l'évaluation énergétique des installations frigorifiques. Il existe également d'autres programmes de calcul ([www.froidefficace.ch](http://www.froidefficace.ch)). Ces outils facilitent la planification d'installations efficaces. Pour l'évaluation des installations de climatisation, il est nécessaire de connaître plusieurs termes de base. En particulier, la norme relative à la ventilation SIA 382/1 (2014) y fait référence. En tant qu'association industrielle, Eurovent, p. ex., définit les tests de machines frigorifiques dans des conditions spécifiques.

#### COP (Coefficient de performance)

Pour les machines frigorifiques et les pompes à chaleur, le coefficient de performance – c'est-à-dire l'efficacité de la machine – est appelé COP. Plus la valeur est élevée, plus la machine frigorifique fonctionne efficacement.

Le COP d'une machine frigorifique ( $\text{COP}_{\text{Froid}}$ ) est le rapport entre la puissance frigorifique et la puissance électrique utilisée. Le COP d'une pompe à chaleur ( $\text{COP}_{\text{Chaleur}}$ ) est le rapport entre la puissance thermique et la puissance électrique utilisée.

#### Energy Efficiency Ratio (EER)

Dans la pratique, on utilise à la fois la désignation EER (Energy Efficiency Ratio) et le  $\text{COP}_{\text{Froid}}$ . Les deux termes décrivent le coefficient de performance de la machine frigorifique et peuvent être utilisés comme synonymes. Dans cet ouvrage technique, nous n'utilisons l'EER qu'en relation avec la norme SIA et la définition de l'ESEER.

#### Coefficient de performance d'une machine frigorifique

Le coefficient de performance idéal de Carnot  $\epsilon_{\text{C Froid}}$  (voir Chap. Principes fondamentaux, équation 3-1) montre que le coefficient de performance représente

le rapport entre le bénéfice et les coûts. Appliqué à la machine frigorifique réelle, le coefficient de performance peut être calculé à partir des sorties d'énergie absorbée et générée (froid). Il est appelé  $\text{COP}_{\text{Froid}}$  (Coefficient de performance) ou EER (Energy Efficiency Ratio):

$$\text{COP}_{\text{Froid}} \text{ ou EER} = \frac{\dot{Q}_{\text{Froid}}}{P_{\text{él}}}$$

Équation 10-1

avec

$\dot{Q}_{\text{Froid}}$  Puissance frigorifique en kW  
 $P_{\text{él}}$  Puissance électrique effective (puissance terminale) en kW<sup>1</sup>

Le coefficient de performance de Carnot  $\epsilon_{\text{C Froid}}$  peut être considéré comme la valeur limite du  $\text{COP}_{\text{Froid}}$ . Il représente le potentiel du  $\text{COP}_{\text{Froid}}$  dans des conditions idéales (inatteignables). Le degré de proximité de la réalité de la condition idéale peut être exprimé par le rapport entre  $\text{COP}_{\text{Froid}}$  et  $\epsilon_{\text{C Froid}}$ .

Ce rapport est appelé rendement de Carnot  $\eta_{\text{c}}$ :

$$\eta_{\text{c}} = \frac{\text{COP}_{\text{Froid}}}{\epsilon_{\text{c Froid}}}$$

Équation 10-2

Le  $\text{COP}_{\text{Froid}}$  est formé à partir des données de performance des points de fonctionnement stationnaires. Les paramètres de ces points de fonctionnement doivent être connus en conséquence. Seuls les indices des mêmes points d'exploitation peuvent être comparés entre eux. Les exigences relatives aux coefficients de performance sont définies dans les normes SN EN 14511 et SIA 382/1 (2014)<sup>2</sup>. Les points à vérifier

<sup>1</sup> Pour des raisons de clarté, la puissance des pompes de circulation, qui doit encore être incluse proportionnellement, est omise ici. Si l'on inclut la capacité de la pompe – comme le stipule la norme SN EN 14511 – le  $\text{COP}_{\text{Froid}}$  chute de 5 à 10 %.

<sup>2</sup> La norme SIA 382/1 (2014) sera modifiée dans un avenir proche et la section sur la climatisation sera probablement déplacée vers la série de normes 384. (État mai 2021).

### Limites du système EER

Le besoin en électricité des pompes des circuits de froid et intermédiaires selon la norme SIA 382/1 (2014).

#### 1. EER pour les générateurs de froid à air

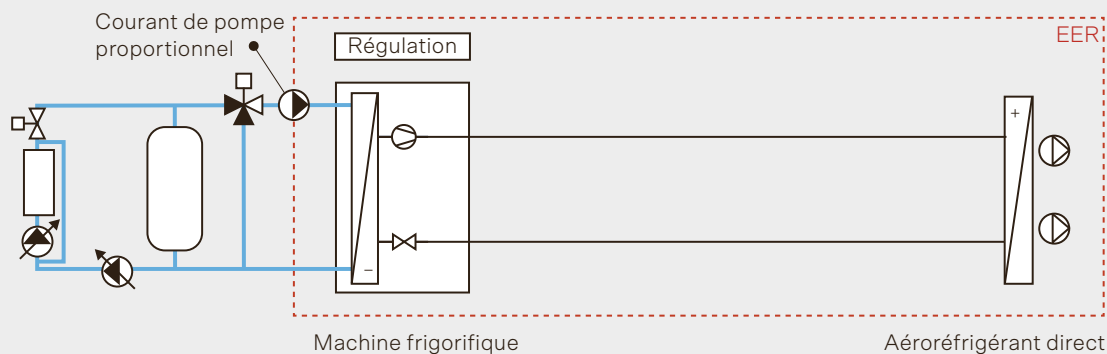


Illustration 10.2: Limites du système pour le calcul de la valeur EER. La demande d'électricité des pompes de l'évaporateur est à inclure proportionnellement, celle des ventilateurs du circuit de re-refroidissement est à inclure dans sa totalité.

#### 2. EER pour les générateurs de froid à eau sans récupération de chaleur

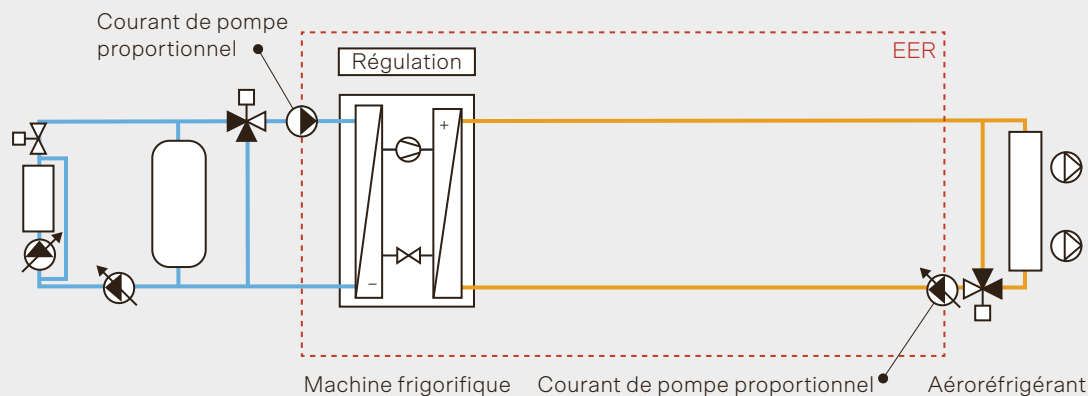


Illustration 10.3: Limites du système pour le calcul de la valeur EER d'une installation frigorifique à eau sans utilisation de la chaleur. La demande d'électricité des pompes de l'évaporateur et du condenseur doit être incluse proportionnellement.

#### 3. EER pour les générateurs de froid à eau avec récupération de chaleur

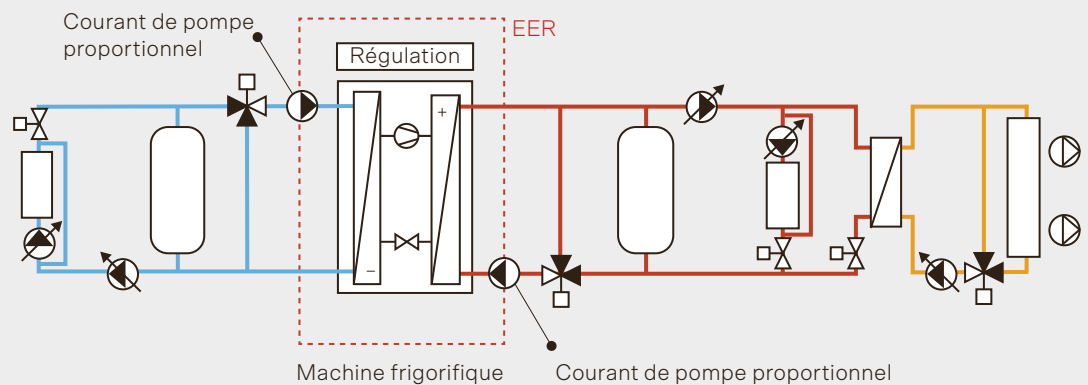


Illustration 10.4: Limites du système pour le calcul de la valeur EER d'une installation frigorifique à eau. La demande d'électricité des pompes de l'évaporateur et du condenseur doit être incluse proportionnellement.

### Limites du système EER<sup>+</sup>

#### 1. EER<sup>+</sup> pour les générateurs de froid à air

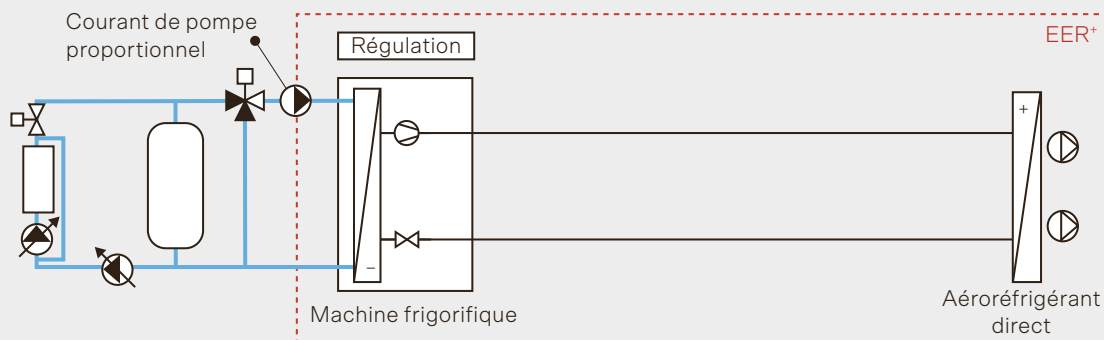


Illustration 10.5: Limites du système pour le calcul de la valeur EER<sup>+</sup>. La demande d'électricité des pompes de l'évaporateur est à inclure proportionnellement, celle des ventilateurs du circuit de re-refroidissement est à inclure dans sa totalité.

#### 2. EER<sup>+</sup> pour les générateurs de froid à eau sans récupération de chaleur

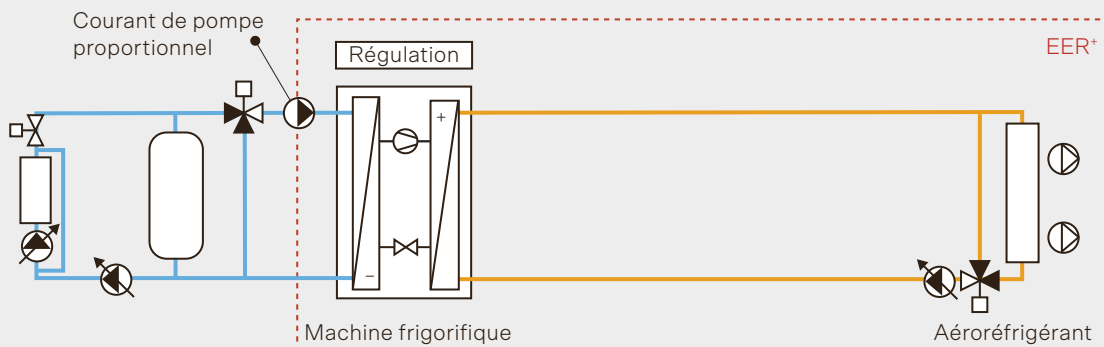


Illustration 10.6: Pour les générateurs de froid à eau sans récupération de chaleur, la consommation d'énergie de l'aérateur avec les pompes et les ventilateurs doit être incluse dans le calcul de la valeur EER<sup>+</sup>.

#### 3. EER<sup>+</sup> pour les générateurs de froid à eau avec récupération de chaleur

Pour les générateurs de froid à eau avec récupération de chaleur, la norme SIA 382/1 (2014) n'est pas directement applicable et elle ne définit pas de limites de système pour l'EER<sup>+</sup> dans ce cas. Cependant, la pratique montre que certains clients ne commandent que des systèmes pour lesquels le planificateur peut spécifier une valeur EER<sup>+</sup>. Au lieu de renoncer maintenant à l'utilisation sensible de la chaleur – juste pour que la valeur EER<sup>+</sup> puisse être vérifiée – il est recommandé de choisir la limite du système indiquée à l'illustr. 10.7. La base du calcul est l'état de fonctionnement dans lequel aucune chaleur n'est utilisée.

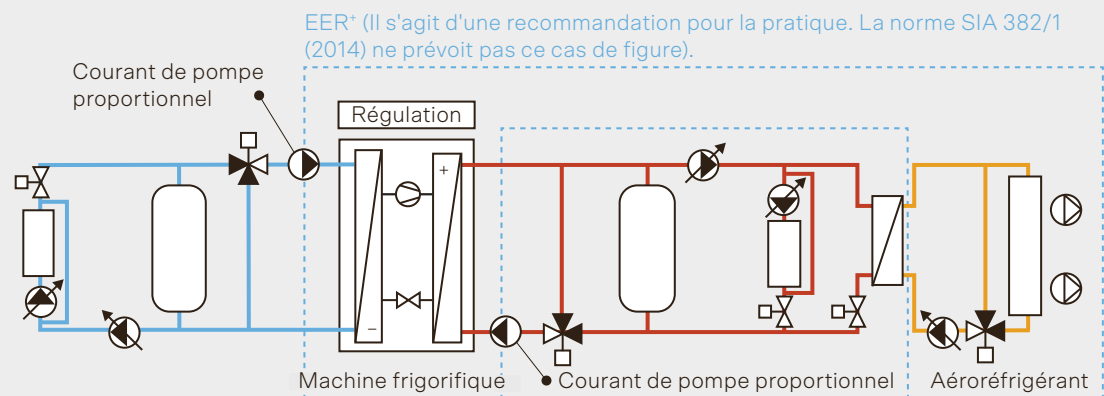


Illustration 10.7: Recommandation sur la façon dont la limite du système pour l'EER<sup>+</sup> pourrait être judicieusement choisie pour les refroidisseurs à eau avec récupération de chaleur.

ne correspondent généralement pas aux points de dimensionnement de l'installation frigorifique.

Lors de l'évaluation de la machine frigorifique seule, c'est-à-dire indépendamment du réseau de froid et du circuit de post-refroidissement, la question se pose de savoir comment prendre en compte les puissances électriques des pompes de ces côtés (réseau de froid et circuit de post-refroidissement). Comme les pertes de charge et les flux volumiques dans le réseau de froid et le circuit de post-refroidissement sont en partie responsables de la consommation d'énergie, la norme SIA 382/1 (2014) stipule que la consommation des pompes est ajoutée dans le rapport des parts de pertes de charge de la machine frigorifique et des échangeurs de chaleur (Illustr. 10.2 à 10.7).

Pour les installations frigorifiques à refroidissement par eau, l'aéroréfrigérant doit être entièrement inclus dans l'évaluation de l'efficacité. À cet effet, la norme SIA 382/1 (2014) définit le EER étendu avec la désignation EER<sup>+</sup>. L'EER<sup>+</sup> étend la limite du système de telle sorte que toute la consommation d'énergie du système de post-refroidissement est entièrement incluse. Les Illustrations 10.2 à 10.7 montrent la distinction entre EER et EER<sup>+</sup>.

Illustration 10.8: Décalage de la température du condenseur pour le calcul de la valeur ESEER aux points de charge partielle.

#### Coefficient de performance saisonnier européen (ESEER)

Le besoin frigorifique dépend généralement de la charge externe d'un bâtiment et donc de la saison. Cela signifie que la machine frigorifique fonctionne en

charge partielle pendant une grande partie du temps. L'efficacité peut être évaluée de manière très précise si l'on additionne et met en relation l'énergie utile totale et l'énergie dépensée totale selon la définition de l'EER pendant une année entière.

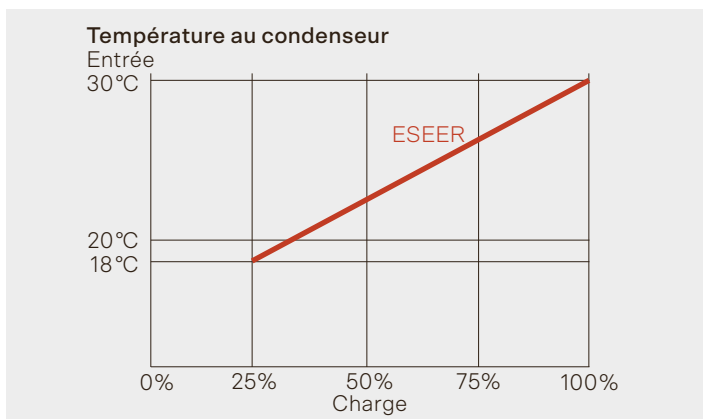
Pour réduire l'effort de calcul préalable, l'année est divisée en quatre plages de charge pour le  $\dot{Q}_{\text{Froid}}$  (100%, 75%, 50%, 25%). Chaque plage de charge se voit attribuer un facteur de pondération correspondant à une durée de fonctionnement supposée de la machine frigorifique pendant un an. La somme des cas de charge pondérés conduit alors à une valeur d'efficacité pour l'année entière. En Europe, cette valeur est appelée ESEER (Coefficient d'efficacité énergétique saisonnier européen):

$$\text{ESEER} = 0,03 \text{ EER}_{100\%} + 0,33 \text{ EER}_{75\%} + 0,41 \text{ EER}_{50\%} + 0,23 \text{ EER}_{25\%}$$

Équation 10-3

Pour le calcul des charges dans le cas de charge partielle, la température de condensation est également décalée selon l'illustration 10.8.

**Remarque:** L'ESEER ne s'applique qu'aux installations classiques de climatisation. Il ne convient pas aux systèmes à forte charge interne (tels que les centres de calcul) ou aux installations utilisant la chaleur. Ces installations ont des durées de fonctionnement complètement différentes de celles sur lesquelles se base le calcul de l'ESEER (voir Équation 10-3).



Pour le calcul de la consommation de froid ou d'énergie des systèmes simples, une estimation peut être faite sur la base des heures annuelles de pleine charge et du coefficient de performance moyen selon ESEER. Les valeurs indicatives correspondantes pour les heures annuelles de pleine charge s'appliquent ici:

- Systèmes plus anciens (souvent un peu surdimensionnés): 600 à 800 heures

- Installations plus récentes avec des charges internes plus élevées (limite de refroidissement à environ 10 °C, dimensionnement plus resserré): 1000 à 1500 heures
- Centres de calcul: 2000 à 4000 heures

Au besoin d'énergie de la machine frigorifique, il faut ajouter celui de l'aéroréfrigérant et des pompes. Un pronostic plus précis du besoin d'énergie de l'ensemble d'une installation frigorifique ne peut être réalisé qu'avec une simulation liée à l'objet. Une autre possibilité est d'estimer la consommation d'énergie avec l'Outil du froid de SuisseEnergie ([www.froidefficace.ch](http://www.froidefficace.ch)).

#### Coefficient de performance saisonnier (SEER)

Le SEER décrit l'efficacité d'une machine frigorifique sur l'année. L'efficacité de la machine frigorifique est déterminée pour quatre températures extérieures (20, 25, 30 et 35 °C) et les coefficients de performance sont pondérés en fonction des temps de course. Cette méthode de calcul est destinée à représenter les conditions de fonctionnement de manière pratique.

#### Coefficient de performance (SCOP)

Le SCOP décrit l'efficacité d'une pompe à chaleur air-eau en mode chauffage au cours de l'année. L'efficacité est déterminée pour quatre températures extérieures (12, 7, 2 et -7 °C) et pour trois zones climatiques (Europe du Sud, centrale et du Nord) et pondérée en conséquence. En Suisse, on utilise les valeurs de la zone climatique d'Europe centrale.

#### Interprétation correcte des coefficients

Avec le  $COP_{\text{Froid}}$ , l'accent était mis dans le passé sur le point de dimensionnement de l'installation frigorifique lors de l'évaluation de l'efficacité énergétique. Cependant, la pratique montre qu'une installation frigorifique ne travaille à pleine charge que pendant 3% de son temps de fonctionnement sur une année. La plupart du temps – les 97% restants – la machine frigorifique fonctionne à charge partielle. En fonctionnement à charge partielle, les conditions d'environnement sont totalement différentes (températures, besoin en froid ...) et la machine frigorifique produit souvent plus efficacement qu'au point de dimensionnement. Afin de mieux refléter les conditions réelles, deux coefficients ont été introduits, l'ESEER (European SEER) et le SEER, qui visent à refléter le fonctionnement réel (charge partielle, température extérieure, temps de fonctionnement...) de manière plus pratique. L'exemple des coefficients pour une machine frigorifique d'une puissance de refroidissement de 300 kW montre que ces trois valeurs sont sensiblement différentes.

$COP_{\text{Froid}}$  3,3

SEER 7,4

ESEER 8,2

#### Facteur de gain électrothermique (ETV)

Le post-refroidissement et les pompes du circuit hydraulique doivent être évalués séparément en termes d'énergie. Le facteur de gain électrothermique (ETV) peut être utilisé à cette fin. L'ETV résulte du rapport entre la puissance thermique

#### Efficacité de l'aéroréfrigérant et de la distribution d'eau glacée – Valeurs indicatives conformément à la norme SIA 382/1 (2014) (à pleine charge)

	Ventilateurs d'aéroréfrigérant	Pompes d'aéroréfrigérant	Pompes d'eau glacée
Facteur de gain électrothermique ETV	> 28	> 85	> 65
Part de la puissance électrique des composants dans la puissance de refroidissement	max. 3,6%	max. 1,2%	max. 1,5%

Illustration 10.9:  
Les exigences selon la norme SIA 382/1 (2014) pour les valeurs ETV des installations d'aéroréfrigérant.



convertie et la puissance électrique utilisée. Pour les aéroréfrigérants, il en résulte les deux formulations ETV:

$$ETV_{\text{Refroidissement (Ventilateurs)}} = \frac{\dot{Q}_{PR}}{P_{\text{Ventilateurs}}}$$

$$ETV_{\text{Refroidissement (Pompes)}} = \frac{\dot{Q}_{PR}}{P_{\text{Pompes}}}$$

$\dot{Q}_{PR}$  Puissance thermique de post-refroidissement en kW

$P_{\text{Ventilateurs}}$  Puissance électrique de raccordement (puissance terminale) en kW

$P_{\text{Pompes}}$  Puissance électrique de raccordement (puissance terminale) en kW

## 10.4 Fonctionnement efficient des installations de climatisation

Qu'est-ce qui influence l'efficacité d'une machine frigorifique?

La définition du coefficient de performance de Carnot montre l'influence des températures dans l'évaporateur et le condenseur. Par conséquent, un rendement énergétique élevé est atteint lorsque:

- la température d'évaporation est la plus élevée possible: La température de l'eau glacée doit donc être choisie élevée.

### Règle générale pour la température de l'eau glacée:

Une température d'eau glacée supérieure de 1 K réduit la consommation d'énergie d'environ 3%.

- La température de condensation est aussi basse que possible: Le choix du système de post-refroidissement a une influence significative sur la température de condensation et donc sur la consommation d'énergie de l'installation frigorifique.

### Règle générale pour la température de condensation:

Une température de condensation inférieure de 1 K réduit la consommation d'énergie d'environ 2,5%.

À cet égard, une différence de température minimale entre l'évaporation et la condensation ne peut être techniquement dépassée.

L'efficacité énergétique de la machine frigorifique est également influencée par:

- Choix du processus (surchauffe des gaz d'aspiration, sous-refroidissement)
- Choix du système (simple ou double, conception parallèle du circuit frigorifique, type d'évaporateur)
- Choix des composants (compresseur, échangeur de chaleur, type d'évaporateur etc.)

La consommation d'énergie des groupes auxiliaires a une influence considérable sur l'efficacité globale d'une installation frigorifique. Alors que le coefficient de performance de la machine frigorifique augmente en fonctionnement à charge partielle avec une température de condensation  $T_C$  plus basse, l'influence proportionnelle de la consommation d'énergie de la pompe augmente.

Dans les installations de climatisation, le traitement de l'air fourni revêt une grande importance sur le plan énergétique. Les conditions climatiques peuvent nécessiter une déshumidification de l'air avant qu'il ne soit injecté dans le bâtiment comme air fourni, car il faut éviter la condensation à l'intérieur du bâtiment (p.ex. avec des plafonds rafraîchissants). Par conséquent, la déshumidification par condensation est spécifiquement déplacée vers l'unité de ventilation centrale. Au cours de ce processus, l'air est refroidi en dessous de sa température de condensation et l'humidité est «absorbée». Le résultat est un air sec mais froid qui doit être à nouveau chauffé à la température souhaitée. Le processus de déshumidification est très gourmand en énergie. La machine frigorifique nécessite plus de puissance et doit fonctionner à des températures plus basses. Les exigences relatives à l'air ambiant dans la zone occupée sont précisées dans la norme SIA 382/1 (2014).

### Comportement des machines frigorifiques en charge partielle

Le terme de charge partielle d’une machine frigorifique doit être défini plus précisément pour les applications en climatisation. La température utile nécessaire est toujours constante. La charge partielle d’une machine frigorifique signifie donc que la puissance frigorifique demandée est moindre, mais que la température du frigoporteur doit rester stable. La machine frigorifique peut y réagir par une régulation du débit massique du fluide frigorigène avec des paramètres de processus par ailleurs constants (voir p.ex. arrêt des cylindres, régulation de la vitesse de rotation etc.) L’ensemble de l’installation peut également réagir au besoin de charge partielle via un accumulateur froid. Cela permet de réduire la durée de fonctionnement de la machine frigorifique.

Les compresseurs ont une influence importante sur la consommation pendant le fonctionnement à charge partielle. Les convertisseurs de fréquence sont de plus en plus utilisés pour la régulation de la vitesse de rotation. Lors de la planification, il est donc impératif de demander au fabricant un historique du comportement à charge partielle des compresseurs dans la plage de puissance requise.

### Influence du type de compresseur sur les performances à charge partielle

La puissance d’une machine frigorifique usuelle est principalement régulée en modifiant le débit massique du fluide frigorigène, la température de sortie de l’évaporateur restant fondamentalement constante. Une réduction du débit massique entraîne alors une réduction de la puissance (voir Chap. 3.5), également appelée état de charge partielle.

Dans les applications de climatisation cependant, la température d’entrée du condenseur est également décalée, comme déjà expliqué dans la définition de l’ESEER, et cette mesure a également une influence dominante sur le coefficient de performance. Selon les

types de compresseurs disponibles, ces deux influences entraînent des augmentations différentes du coefficient de performance liés à l’accroissement de la charge partielle. Le comportement des turbocompresseurs en particulier est détaillé dans l’Annexe 11.3.

#### Aide à la sélection des compresseurs

Sur mandat de SuisseEnergie, la ZHAW a rédigé une étude sur les différents types de compresseurs. L’étude compare les différents types. En quelques saisies, un outil simple compile les compresseurs utilisables et leur efficacité (COP). Diverses fiches d’information complémentaires fournissent des informations de base approfondies aux experts intéressés.

En général, le planificateur définit les conditions limites du système. Le fabricant de la machine décide, sur la base de ces conditions limites et des compresseurs disponibles, quel type de compresseur est le mieux adapté. Le planificateur ou le client ne prescrit le type de compresseur que dans des cas exceptionnels. L’étude et le Tool compresseur seront publiés sur [www.suisseenergie.ch](http://www.suisseenergie.ch) à partir de l’automne 2021.

### Aperçu des exigences selon la norme SIA 382/1 (2014)

L'illustration 10.10 résume les exigences énergétiques de la norme SIA 382/1 (2014) pour les installations de climatisation.

Les valeurs limites (EER, ESEER) spécifiées dans la norme SIA 382/1 (2014) incluent l'énergie auxiliaire (part du cou-

rant de la pompe et du courant pour la régulation). Lorsque le calcul simplifié décrit dans le Cahier technique est utilisé (mesure de la puissance terminale sans la part du courant de la pompe), il faut s'attendre à des valeurs limites supérieures de 5 à 10 %.

$$\text{COP}_{\text{Froid}}/1,1 = \text{ERR}_{\text{«SIA»}}$$

#### Exigences énergétiques des générateurs de froid sous conditions standard

Puissance de production de froid de la machine frigorifique	≤ 12 kW	100 kW	300 kW	600 kW	≥ 1000 kW
<b>Machines frigorifiques refroidies à l'eau</b>					
Valeur-limite EER (pleine charge)	3,85	4,25	4,65	5,05	5,50
Valeur-limite ESEER (pleine charge et charge partielle)	4,30	4,80	5,50	6,10	6,70
Classe Eurovent selon EN 14511, au moins	D	C	B	A	A+
<b>Installations frigorifiques refroidies à l'eau, y c. post-refroidissement (pompes et ventilateurs)</b>					
Valeur-limite EER <sup>+</sup> à pleine charge	3,10	3,20	3,30	3,50	3,70
Valeur-limite EER <sup>+</sup> à 50 % de charge	4,40	4,70	5,30	5,80	6,00
<b>Machines frigorifiques refroidies à l'air</b>					
Puissance de production de froid de la machine frigorifique	12 kW	100 kW	300 kW	600 kW	≥ 1000 kW
Valeur-limite EER (pleine charge)	2,90	3,10	3,20	3,40	3,50
Valeur-limite ESEER (pleine charge et charge partielle)	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60
Classe Eurovent selon EN 14511, au moins	B	A	A+	A++	A++

Illustration 10.10: Exigences énergétiques des installations de climatisation selon SIA 382/1 (2014).

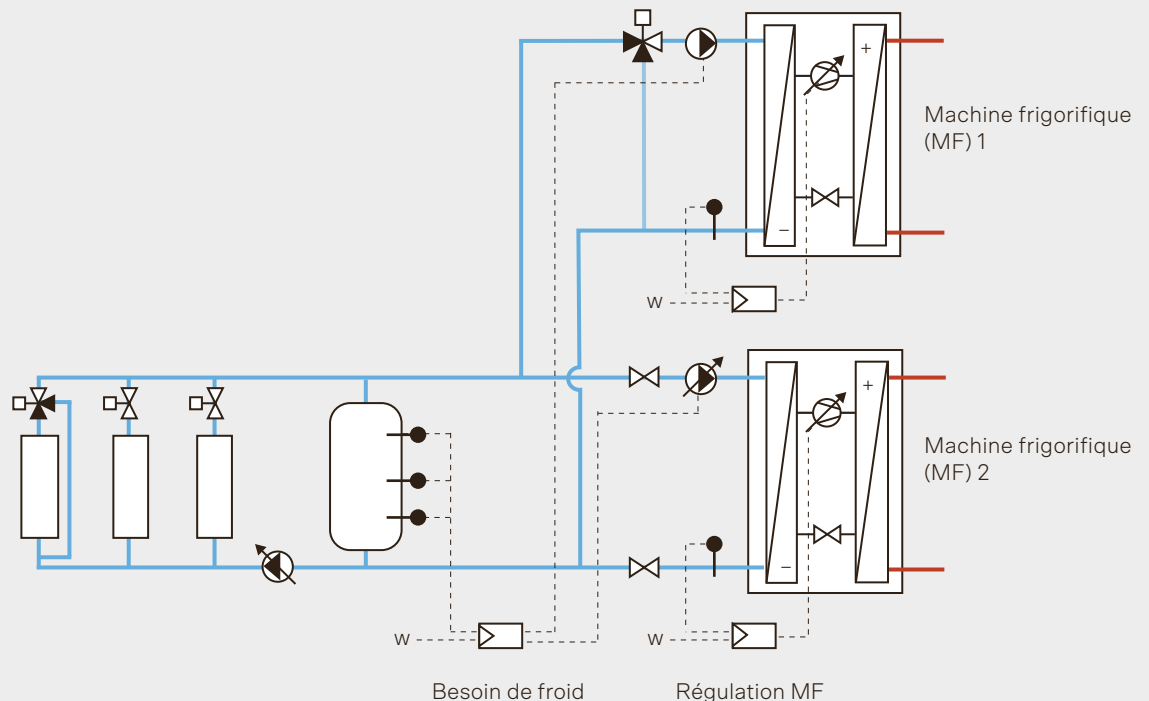


Illustration 10.11: Deux machines frigorifiques avec accumulateur de froid.

### Gestion de l'accumulateur

Les systèmes avec accumulateur frigorifique permettent aux machines frigorifiques – en fonction de la puissance frigorifique et de la température de condensation – de fonctionner dans la plage de puissance énergétiquement optimale grâce à la gestion de l'accumulateur. Le nombre de machines en fonctionnement ainsi que leurs puissances peuvent être spécifiés par la gestion de l'accumulateur en fonction de l'état de charge de l'accumulateur et de la tendance à la charge. La solution est présentée dans l'illustration 10.11.

Lorsqu'il y a plusieurs machines frigorifiques, les unités individuelles peuvent être mises en marche et arrêtées par le biais de la charge de l'accumulateur. Cela signifie que les machines frigorifiques fonctionnent chacune à pleine charge. Comme le rendement à 100 % de la puissance tend à être moins bon qu'à charge partielle, le rendement énergétique global de l'installation est moins bon.

Pour les machines frigorifiques fonctionnant plus efficacement à charge partielle qu'à pleine charge, il est préférable de maintenir la charge de l'accumulateur à une valeur constante (p. ex. à 50 %) et de pré régler la puissance de la machine frigorifique, par exemple via le débit de l'évaporateur. De cette façon, la machine frigorifique fonctionne efficacement à charge partielle. En outre, cela présente l'avantage de réduire la consommation d'électricité des pompes.

Un autre avantage est que le nombre de démarrages et d'arrêts est réduit. Outre le fait qu'un nombre excessif de démarrages affecte la durée de vie de la machine frigorifique, il y a besoin d'un certain temps (selon la taille du système – généralement plus de 5 minutes) pour que le niveau de fonctionnement soit atteint en raison de l'inertie du système thermique. Les performances pendant cette période ne correspondent pas aux performances à pleine charge.

### Utilisation combinée de la chaleur et du froid

Dans le cas où la machine frigorifique-thermique peut être utilisée pour le refroidissement et le chauffage, le coefficient de performance doit être redéfini. L'utilisation (refroidissement et chauffage simultanés) est alors composée de la somme du  $\dot{Q}_{\text{Froid}}$  et du  $\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$ . Les coûts (puissance d'entraînement du compresseur) restent inchangés, ce qui se traduit par le coefficient de performance pour l'utilisation du froid et de la chaleur ( $\text{COP}_{\text{Froid+Chaleur}}$ ):

$$\text{COP}_{\text{Froid+Chaleur}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Froid}} + \dot{Q}_{\text{Chaleur}}}{P_{\text{él}}}$$

$\text{COP}_{\text{Froid+Chaleur}}$  Coefficient de performance pour l'utilisation du froid-chaleur

$\dot{Q}_{\text{Froid}}$  Puissance frigorifique utile en kW

$\dot{Q}_{\text{Chaleur}}$  Puissance calorifique utile en kW

$P_{\text{él}}$  Puissance électrique de raccordement (puissance terminale) en kW

En principe, les remarques suivantes peuvent être faites pour l'utilisation de la chaleur:

- La machine frigorifique continue à fonctionner normalement, la chaleur peut être utilisée (ou évacuée via l'aéroréfrigérant) sans augmenter la température de condensation.
- Lorsqu'il y a une demande de chaleur à un niveau de température plus élevé, la machine frigorifique fonctionne avec une température de condensation plus élevée. Un calcul de rendement est nécessaire.

L'illustration 10.12 analyse le bénéfice de l'utilisation de la chaleur pour le fluide frigorigène R134a à une température d'évaporation de 0 °C. Avec une température de condensation de 20 °C, la chaleur ne peut pas être utilisée – elle est libérée dans l'atmosphère via l'aéroréfrigérant. Cette condition est considérée comme une référence avec des conditions ambiantes pour la période transitoire et un besoin de refroidissement élevé, comme dans les salles de ser-

veurs. En augmentant la puissance du compresseur (consommation d'énergie plus élevée), la condensation peut être portée à un niveau plus élevé et la chaleur de condensation peut être exploitée. L'illustration 10.12 montre l'importance de ce coût supplémentaire. Il faut veiller à ce que, lorsque la température de condensation est relevée, toute la chaleur produite soit utilisée. Lorsque seule une partie de la chaleur supplémentaire peut être utilisée, les coûts d'utilisation de la chaleur augmen-

tent par rapport au besoin effectif de chaleur. Lorsque, par exemple, seuls 50 % peuvent être utilisés, l'utilisation de la chaleur coûtera deux fois plus cher par kWh; à 25 %, elle coûtera quatre fois plus cher.

Voir également en détail le Chapitre 7, Dégagement de chaleur.

**Exemple de lecture:** Une machine frigorifique fournit 100 kW de froid à 0 °C (température d'évaporation) et condense à 20 °C. Un consommateur de chaleur à

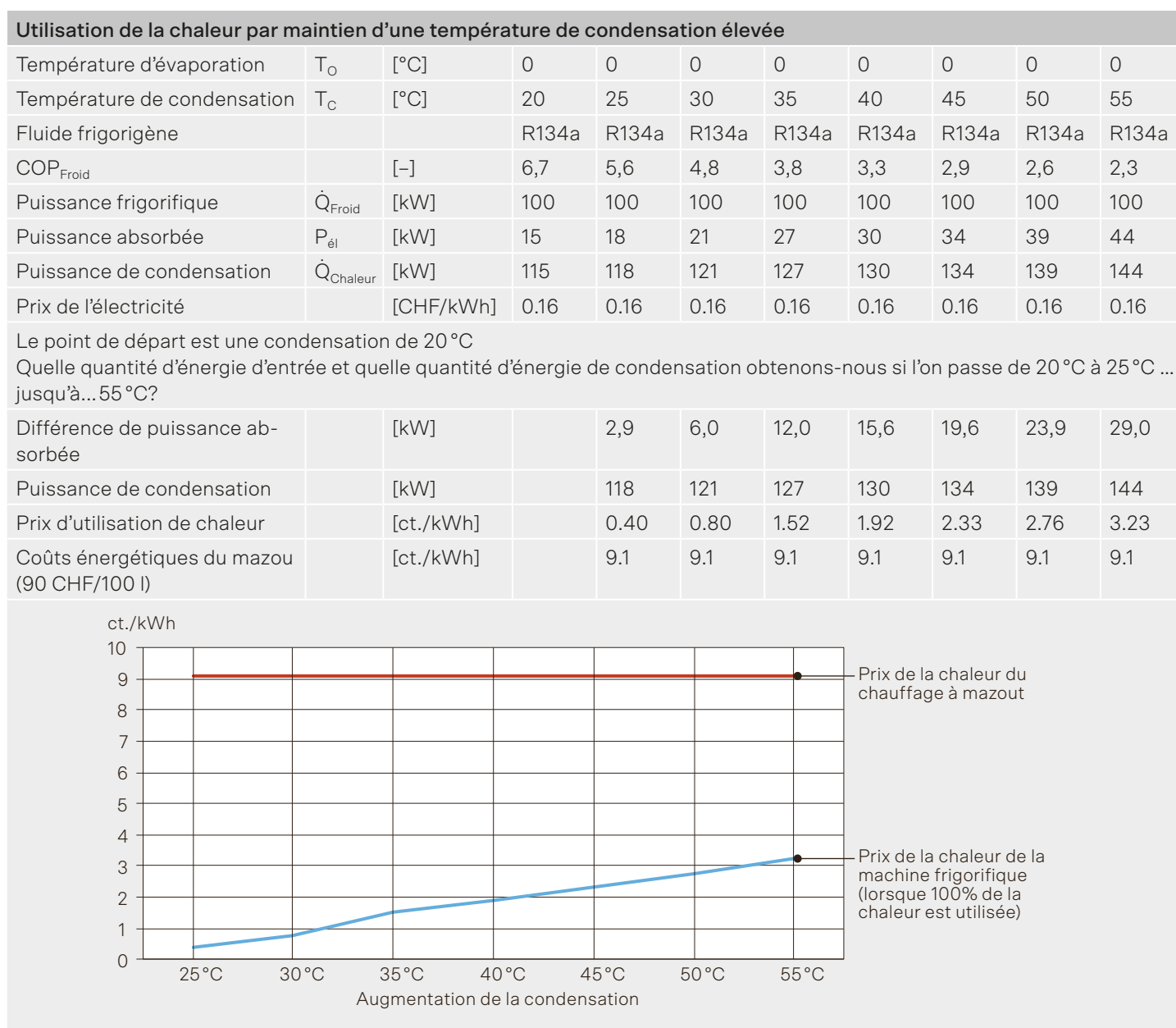


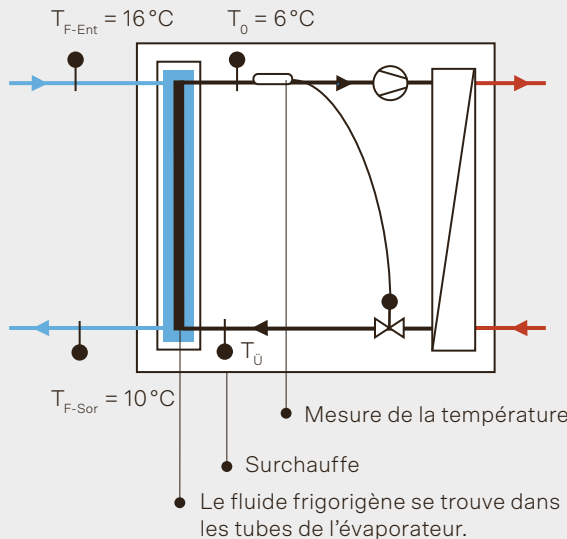
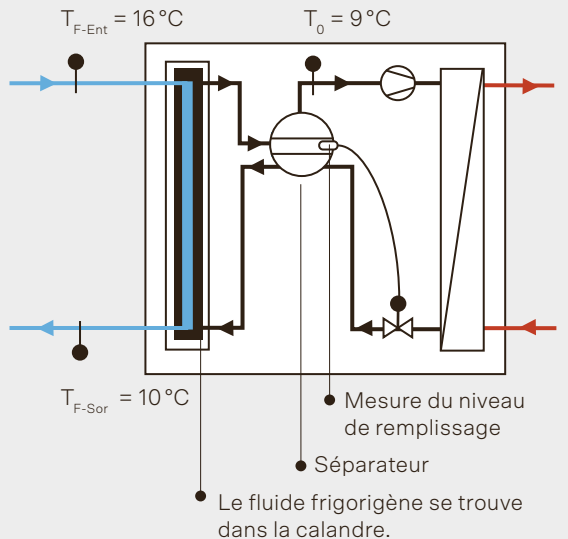
Illustration 10.12: Coûts de l'énergie pour l'augmentation de la température de condensation d'une machine frigorifique. (Source: Leplan AG)

55°C peut alors recourir à 144 kW lorsque la machine frigorifique augmente sa condensation.

Cela fait baisser le COP de la machine frigorifique ( $COP_{Froid}$ ) de 6,8 à 2,3. La chaleur produite coûte à l’exploitant 3,23 ct./kWh. Elle est donc nettement moins chère que la chaleur fournie par une chaudière à mazout (9,1 ct./kWh).

### Influence sur l’efficacité énergétique de détente sèche et de l’évaporateur noyé

Le type d’évaporateur a une influence significative sur l’efficacité d’une machine frigorifique. La comparaison d’une machine équipée d’un évaporateur à détente sèche avec une machine équipée d’un évaporateur noyé illustre ce point. Les deux machines doivent fournir de l’eau glacée à 10°C, elles doivent fonctionner avec du R134a et se condenser à 35°C.

Principe	Détente sèche	Évaporateur noyé
Description	<p>Dans les évaporateurs à détente sèche, la quantité de fluide frigorigène est réglée par un détendeur de façon à évaporer et surchauffer complètement le fluide à la sortie.</p> <p>Le fluide frigorigène se trouve dans les tubes de l’évaporateur. Le système a ainsi moins besoin de fluide frigorigène.</p>	<p>Le compresseur aspire le gaz complètement évaporé de la partie supérieure du séparateur. En fonction du niveau dans le séparateur, le détendeur règle le niveau dans le séparateur, garantissant que seul le fluide frigorigène entièrement évaporé est aspiré. Étant donné que l’évaporateur est rempli de fluide frigorigène, le système nécessite une quantité relativement importante de ce fluide dans les évaporateurs à faisceaux de tubes. Dans les systèmes équipés d’évaporateurs à plaques, la quantité de fluide frigorigène n’est pas sensiblement plus importante que dans l’évaporateur à détente sèche.</p>
Aperçu	 <p> <math>T_{F-Ent} = 16^\circ C</math>    <math>T_0 = 6^\circ C</math>  <math>T_{F-Sor} = 10^\circ C</math>            Mesure de la température            Surchauffe            Le fluide frigorigène se trouve dans les tubes de l'évaporateur.         </p>	 <p> <math>T_{F-Ent} = 16^\circ C</math>    <math>T_0 = 9^\circ C</math>  <math>T_{F-Sor} = 10^\circ C</math>            Mesure du niveau de remplissage            Séparateur            Le fluide frigorigène se trouve dans la calandre.         </p>

Principe	Détente sèche	Évaporateur noyé
Températures du système		
	<p>Lorsque de l'eau froide à 10 °C est nécessaire, il faut utiliser un évaporateur à détente sèche dont la température d'évaporation est de 6 °C.</p>	<p>Lorsque de l'eau froide à 10 °C est nécessaire, un évaporateur noyé avec une température d'évaporation de 9 °C peut être utilisé dans les machines frigorifiques sans surchauffe.</p>
	<p>Avec un évaporateur noyé, le système peut fonctionner avec une température d'évaporation <math>T_0</math> supérieure de 3 K et est donc plus efficace (règle empirique: une température d'évaporation supérieure de 1 K entraîne une consommation d'énergie inférieure d'environ 3%). Cela peut s'expliquer par la courbe de température du côté du fluide frigorigène dans les deux types d'évaporateurs.</p>	
Considération du diagramme log p,h		
	<p>En raison de la surchauffe nécessaire, les points de fonctionnement dans le diagramme log p,h se déplacent.</p>	
	<p>Remarque: il s'agit d'une représentation simplifiée du diagramme log p,h. Dans la pratique, il est nécessaire de travailler avec un sous-refroidissement minimum pour garantir le bon fonctionnement du dispositif de dilatation et l'absence de bulles de fluide frigorigène devant le détendeur (voir chapitre 3).</p>	
Performance	<p><math>COP_{Froid} = 7,0</math> (calculé) (Consommation d'énergie: 100 %)</p>	<p><math>COP_{Froid} = 8,0</math> (calculé) (Consommation d'énergie: 87,5 %) Règle empirique: 3 K fois 3 % = consommation d'énergie réduite d'env. 9 %</p>
	<p>Dans le contexte global, cet exemple montre: Les évaporateurs noyés sont nettement plus efficaces que les évaporateurs à détente sèche. L'équation 10-1 permet de calculer les économies d'énergie électrique. Cependant, un évaporateur noyé ne peut pas être utilisé dans tous les cas. En effet, la quantité de réfrigérant nécessaire (ORRChim) et les coûts sont d'autres aspects à prendre en compte.</p>	

## 10 points relatifs à l'efficacité énergétique des installations de climatisation

1. L'installation frigorifique ne fonctionne que lorsque les consommateurs de froid ou l'accumulateur de froid ont besoin de refroidissement.
2. Il faut définir la température de départ du refroidissement aussi élevée que possible. Il faut vérifier si le poste frigorifique le plus froid justifie de définir la température de départ des consommateurs de froid ou s'il est préférable de résoudre ce problème séparément. Règle générale: Une température d'eau glacée supérieure de 1 K réduit la consommation d'énergie d'environ 3%.
3. Il faut dimensionner la condensation à la température la plus basse possible. Lorsque la température de condensation est rehaussée pour l'exploitation de la chaleur, il ne faut l'augmenter que tant que la chaleur est nécessaire. Règle générale: Une température de condensation inférieure de 1 K réduit la consommation d'énergie d'environ 2,5%.
4. Il faut utiliser la chaleur produite par la machine frigorifique: pour chauffer l'eau sanitaire, pour le chauffage ou pour régénérer les sondes géothermiques.
5. Il faut vérifier l'utilisation des détendeurs électroniques.
6. Il faut vérifier l'utilisation de compresseurs efficaces et à vitesse de rotation régulée.
7. Il faut réduire les pertes de charge dans le réseau de post-refroidissement et le réseau de poste frigorifique.
8. Il faut utiliser des pompes à vitesse régulée et efficaces.
9. Il faut effectuer une évaluation globale de l'installation à pleine charge et à charge partielle.
10. Il faut vérifier l'efficacité énergétique lors de la mise en service de l'installation frigorifique et au moins une fois par an par la suite.





# Annexe

## 11.1 Auteurs



**Arnold Brunner**, ing. dipl. HES/SIA, Professeur en gestion technique du bâtiment. 1978: Diplôme de l'École d'ingénieurs sanitaires, Berne. Séjours à l'étranger (Arabie Saoudite et Angleterre). 1984: Diplôme de la Haute-école de Lucerne T + A; de 1984 à 1987: Chef de projet chez Meierhans + Partner AG, Fällanden. De 1988 à 2011: Fondateur et directeur chez Brunner Haustechnik AG (BHT) à Wallisellen avec 27 collaborateurs. 2010: Vente de BHT à Hälgrouppe (aujourd'hui Vadea AG). 2011 à aujourd'hui: Consultant senior chez Vadea (40%). 2012 à 2017: chargé de cours à plein temps pour la gestion technique du bâtiment à la Haute-école de Lucerne (HSLU), Département Technique & Architecture. De 2017 à 2018: Chargé de cours à la HSLU. Actif dans l'élaboration de normes nationales et internationales (SIA, SICC VDI, CEN, ISO).



**Michael Kriegers**, ing. dipl. HES CVC  
1994: Chef de projet CVC chez Meierhans + Partner AG, Schwerzenbach.  
1999: NDS Bâtiment, Énergie et Environnement EPF, 2006: NDS Ingénieur en économie EPF. 1999 à 2005: professeur à temps partiel de l'École professionnelle des planificateurs en techniques du bâtiment à l'École professionnelle de la construction de Zurich (BBZ). 2000 à aujourd'hui: professeur à temps partiel NDS Energy et expert diplômé à la Haute-école spécialisée de BBZ. En outre, de 2006 jusqu'à aujourd'hui: professeur à temps partiel à la Haute-école spécialisée de BBZ. De 2007 à 2017: membre du Conseil d'administration de SICC et délégué pour les directives. De 2008 à aujourd'hui: en tant qu'associé de Meierhans + Partner AG, responsable de la gestion de projets complexes dans le domaine de la technique du bâtiment et membre de la Direction.



**Vladimir Prochaska**, ing. dipl. TU  
De 1971 à 1981: Sulzer AG, planification et réalisation de systèmes de climatisation et de ventilation. De 1981 à 1987 chez Sulzer Friotherm: planification, vente et réalisation de pompes à chaleur et d'installations frigorifiques jusqu'à 30 MW de puissance. De 1987 à 1997: Ulzer Infra, responsable de la technologie de mesure et de contrôle, puis de l'ingénierie. De 1997 à 2007: Friotherm AG, chef des ventes Suisse, systèmes de refroidissement et de pompes à chaleur. De 1997 à 2016: conseil et formation dans le secteur du froid (à partir de 2007, expert frigoriste indépendant). De 1990 à 2016: d'abord expert diplômé à la HSLU, puis chargé de cours pour la technique du froid et des pompes à chaleur. Actif dans l'élaboration de normes nationales et internationales (SIA, SICC, CEN).



**Frank Tillenkamp**, Dr ing., Professeur en systèmes d'énergie  
1994: Diplôme d'ingénieur en mécanique générale à l'Université technique de Darmstadt. 2000: doctorat dans le domaine des flux diphasiques. De 1999 à 2002: ingénieur de développement chez Sulzer Innotec. De 2002 à 2009: diverses tâches chez Axima, dont la direction du Centre technologique Axima Lab et la direction de la filiale. De 2009 à aujourd'hui: chargé de cours à plein temps à l'École d'ingénieurs ZHAW de Winterthur. 2010: Création et gestion de l'Institut pour les systèmes énergétiques et l'ingénierie des fluides. Mise en place des activités de refroidissement et du banc d'essai de réfrigération à l'Institut. Collaboration au sein de la SIA, de l'ASF et de Brenet (Réseau technologique du bâtiment et des énergies renouvelables).

## 11.2 Documentation

### Normes SIA

- **SIA 180** Isolation thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments (2014)
- **SIA 380/1** Besoins de chaleur pour le chauffage (2016)
- **SIA 382/1** Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises (2014)
- **SIA 382/2** Bâtiments climatisés – Puissance requise et besoins d'énergie (2011)
- **SIA 384/6** Sondes géothermiques (2010)
- **SIA 384/7** Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine (2015)

### Directives SICC

- Post-refroidissement 2003-3
- Accumulateur de chaleur à eau, 2002-1
- Qualité de l'eau dans les installations techniques du bâtiment BT102-01

### Cahiers techniques SIA

- Bâtiments vitrés – Confort et efficacité énergétique, n° 2021
- Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment, n° 2028
- Bâtiments climatisés – Méthode de calcul standard pour la puissance requise et les besoins d'énergie, n° 2044
- Tests intégraux des systèmes des installations du bâtiment, n° 2046

### Normes suisses (SN) et normes européennes (EN)

- Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement, SN EN 378-1 à 378-3, et Partie Maintenance de la norme SN EN 378-4
- Performance énergétique des bâtiments – Impact de l'automatisation de la régulation et de la gestion technique du bâtiment, (EN) 15232
- Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur pour le chauffage et le refroidissement des lo-

caux et refroidisseurs industriels avec compresseur entraîné par moteur électrique, SN EN 14511

### Fluides frigorigènes

- Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim), RS 814.81, Annexe 2.10
- Installations contenant des fluides frigorigènes: du concept à la mise sur le marché, Aide à l'exécution Fluides frigorigènes, OFEV
- Dérogation par l'OFEV. «Formulaire de demande de dérogation pour installation frigorifique», [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)
- Directive relative à l'entreposage et à l'utilisation d'ammoniac, Directive relative aux gaz liquéfiés n° 6517 (CFST)
- Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur. Feuillet technique SUVA, 66139
- Guides des fluides frigorigènes pour les spécialistes en chauffage, ventilation et climatisation, SuisseEnergie

### Énergie et sécurité

- Production efficace de froid: L'essentiel sur la production de froid selon SIA 382/1 82014), SuisseEnergie
- Loi sur l'énergie – Modèle de prescriptions énergétiques des cantons, (MoPEC)
- Ordonnance sur la sécurité des équipements sous pression (Ordonnance relative aux équipements sous pression), RS 819.121
- Logiciel d'estimation (Outil du froid) de SuisseEnergie: Estimer le besoin d'énergie, le TEWI et la rentabilité des installations frigorifiques

### 11.3 Approfondissement 1: Turbocompresseur

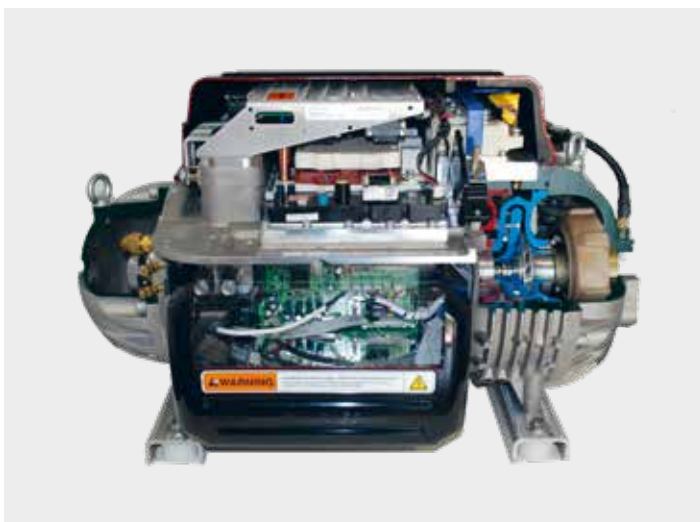
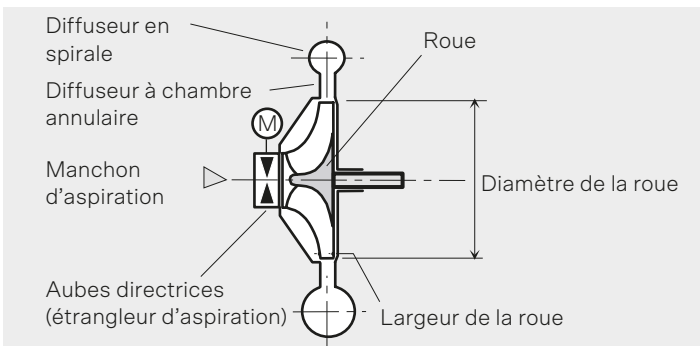
Le turbocompresseur est une machine à écoulement continu. Dans la **roue du compresseur**, le gaz à comprimer est accéléré à une vitesse élevée et l'énergie cinétique ainsi obtenue est convertie en pression statique dans un diffuseur. Le comportement du turbocompresseur peut être comparé à celui d'une pompe. Le turbocompresseur a des caractéristiques très différentes de celles du compresseur volumique.

Le diamètre de la roue et sa vitesse de rotation influencent la différence de pression générée par le compresseur. La largeur de la roue détermine le débit, c.-à-d. la puissance de refroidissement du compresseur.

Une innovation importante de ces dernières années dans le secteur de la climatisation est le turbocompresseur semi-hermétique avec convertisseur de fréquence et palier magnétique intégrés.

Illustration 11.1:  
(en haut): Principe d'un turbo-compresseur.

Illustration 11.2:  
(en bas): Turbo-compresseur semi-hermétique avec convertisseur de fréquence et palier magnétique intégrés. (Photo: Danfoss)



Ce compresseur se caractérise par une grande efficacité énergétique. Avec un dimensionnement correct, des coefficients de performance de plus de 10 peuvent être atteints à charge partielle et à des températures réduites du médium de l'aéroréfrigérant.

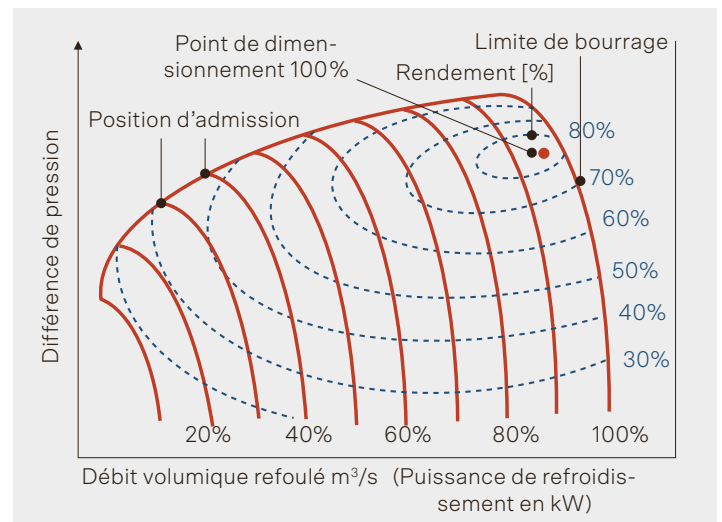
#### Caractéristiques du turbo-compresseur à vitesse de rotation constante

Le turbocompresseur est dimensionné pour une pression différentielle spécifique. L'illustration 11.3 montre une courbe caractéristique typique: avec une puissance croissante (volume d'aspiration), la différence de pression réalisable augmente jusqu'au maximum. Passé ce point, la valeur décroît fortement (limite de bourrage).

Les courbes dites «en forme de moules» montrent l'évolution du rendement. Dans les systèmes à vitesse de rotation constante, à pleine charge, la puissance frigorifique du compresseur augmente avec la diminution de la différence de pression de l'installation ( $T_C - T_0$ ). Au point de dimensionnement, le turbocompresseur atteint généralement le rendement le plus élevé.

Comme la puissance est réduite par la régulation de l'organe d'aspiration (position d'admission), la différence de pression maximale réalisable diminue. Avec un fort étranglement et des aubes d'admission de plus en plus fermées, le rendement du compresseur chute brutalement.

Illustration 11.3:  
Caractéristiques de fonctionnement d'un turbo-compresseur à vitesse de rotation constante.



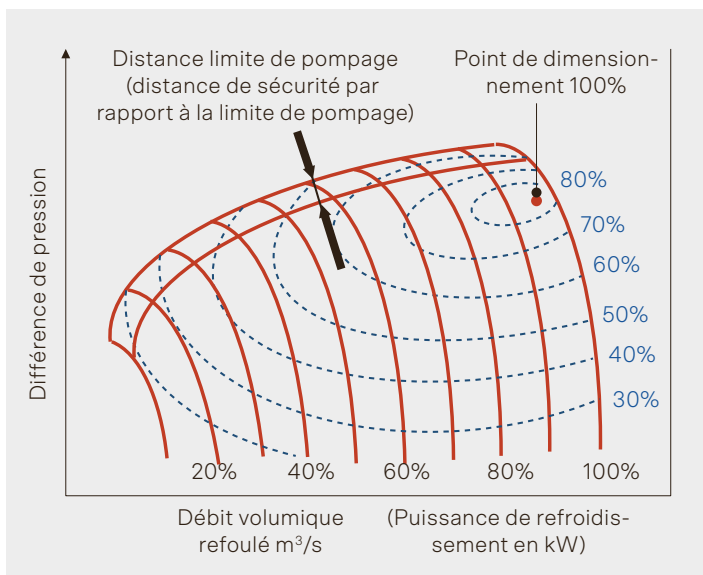
### Le comportement d'un turbo-compresseur

La partie supérieure de la performance du turbocompresseur correspond à la pression la plus élevée que le compresseur peut engendrer. Lorsque le système nécessite une différence de pression plus élevée (p.ex. une température de condensation trop élevée), le point de fonctionnement se situe au-dessus de la caractéristique. Dans cette plage, l'écoulement dans la roue s'interrompt et le compresseur commence à «pomper». Il s'agit d'une opération instable qu'il convient d'éviter à tout prix pour les raisons suivantes:

- sollicitation trop élevée sur le compresseur (peut entraîner sa détérioration)
- mauvais rendement
- puissance de refroidissement réduite

Une caractéristique de l'exploitation à des valeurs proches de la limite de pompage est une consommation d'énergie fluctuante du compresseur. Pour garantir la sécurité du compresseur, le point de fonctionnement doit être inférieur à la caractéristique. Cette marge de sécurité est définie comme la limite de pompage.

Illustration 11.4:  
Caractéristique de fonctionnement d'un turbo-compresseur montrant la limite de pompage.

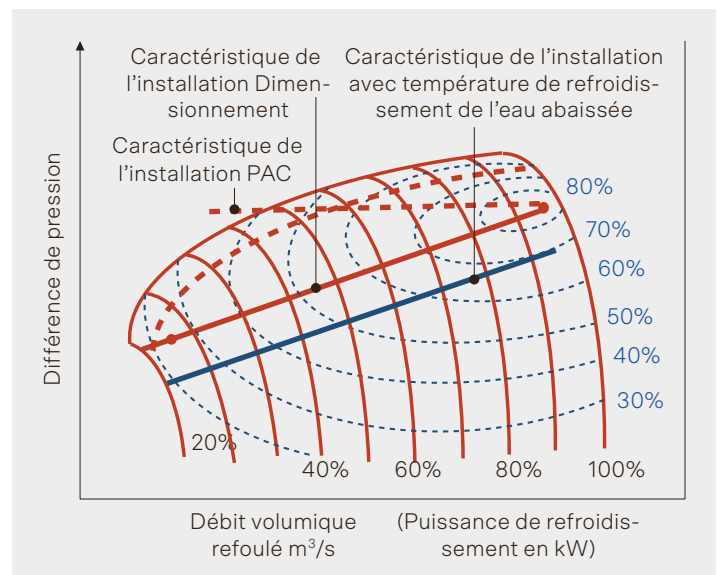


### Courbe caractéristique de l'installation

Dans une installation frigorifique, la courbe du système diminue parallèlement à la puissance de refroidissement, car la température de condensation est réduite en conséquence avec la baisse de la puissance.

Dans le cas d'une pompe à chaleur ou d'une machine frigorifique avec récupération de chaleur, la courbe caractéristique du système est presque horizontale, ce qui limite la plage de régulation. Afin de l'élever, la distance à la limite de pompage doit être augmentée au point de dimensionnement, ce qui entraîne une réduction du rendement.

Illustration 11.5:  
Caractéristiques de l'installation et du fonctionnement d'un turbo-compresseur avec des caractéristiques d'installation saisies.



### Caractéristiques du turbocompresseur à vitesse de rotation variable

L'illustration 11.6 présente les caractéristiques d'un compresseur à régulation de vitesse. À charge partielle et à puissance réduite, la différence de pression ( $T_C - T_0$ ) diminue également. Lorsque la vitesse du compresseur est réduite, le point de fonctionnement se déplace vers le bas et vers la gauche. Dans ce cas, les courbes de rendement sont également décalées. Au nouveau point de fonctionnement, le compresseur fonctionne toujours avec un rendement élevé. Cela améliore considérablement l'efficacité de l'installation de refroidissement à charge partielle, le moment où le nombre d'heures de fonctionnement est le plus élevé.

Une augmentation supplémentaire de l'efficacité énergétique peut être obtenue en réduisant la température de l'eau de refroidissement. Dans ce cas, des coefficients de performance supérieurs à 10 sont possibles. Cependant, il faut noter qu'à charge partielle, à vitesse réduite, la limite de bourrage du compresseur est décalée vers la gauche. Par conséquent, la puissance nominale ne peut être atteinte à ce point de fonctionnement.

Illustration 11.6:  
Caractéristiques de l'installation et du fonctionnement d'un turbo-compresseur avec régulation de la vitesse de rotation.

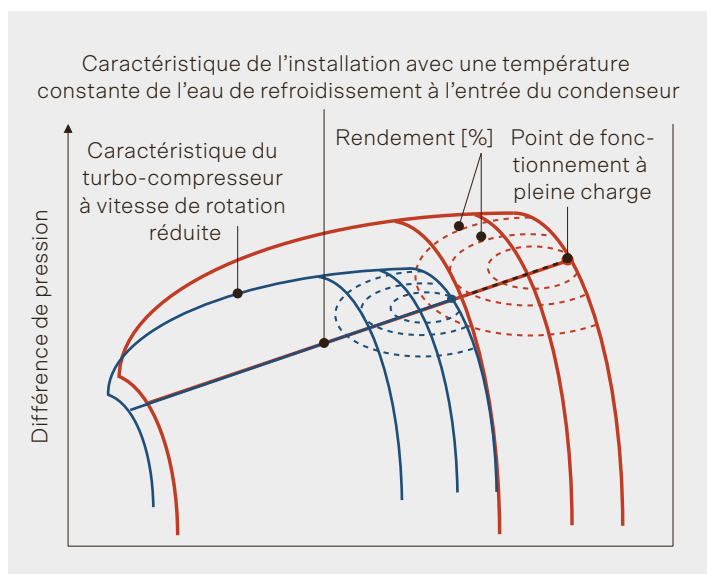
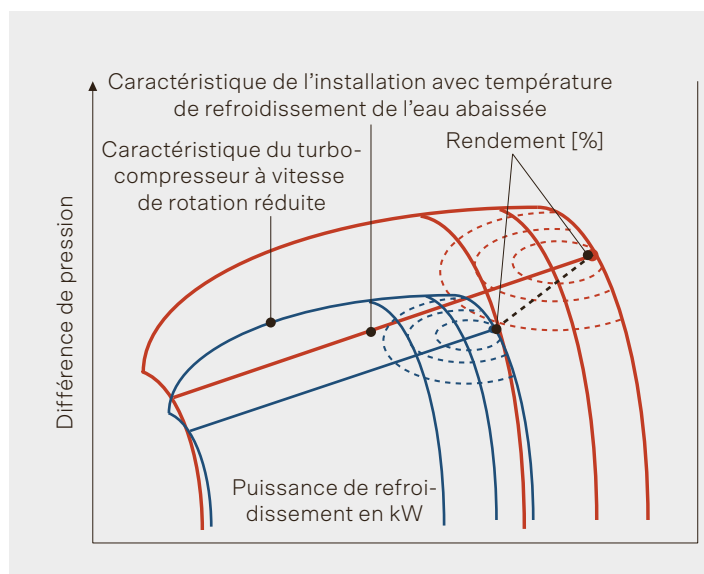


Illustration 11.7:  
Caractéristiques de l'installation et du fonctionnement d'un turbo-compresseur avec régulation de la vitesse de rotation et avec températures du médium de refroidissement abaissée.



## 11.4 Approfondissement 2: Dimensionnement et caractéristique des pompes

La pompe fournit l'énergie hydraulique. La puissance de refoulement est directement liée à la vitesse de rotation et aux caractéristiques de la pompe.

À vitesse de rotation constante, les valeurs de base de la pompe sont maintenues selon la courbe caractéristique. À vitesse de rotation variable, le point de fonctionnement change en fonction de la vitesse et de la courbe caractéristique du système.

### Puissance requise de la pompe

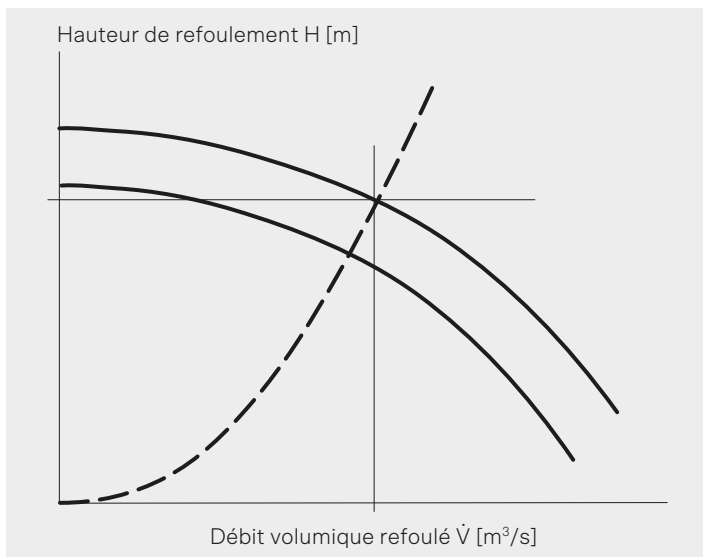
$$P = \frac{\dot{V} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} \text{ [W]}$$

$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s
H	m
$\rho$	kg/m <sup>3</sup> (eau 1000)
g	9,81 m/s <sup>2</sup>

Pour l'eau:

$$P = \frac{9810 \cdot \dot{V} \cdot H}{\eta} \text{ [W]}$$

Illustration 11.8:  
Caractéristiques de la pompe avec la courbe de fonctionnement.



La puissance maximale d'une machine frigorifique-thermique n'est normalement requise que quelques jours par an. Cela signifie que dans les installations fonctionnant avec des flux volumiques

constants, la plupart du temps une quantité inutilement importante d'énergie est nécessaire pour entraîner les pompes. Afin d'augmenter l'efficacité énergétique des installations, il est donc judicieux d'utiliser des débits volumiques variables. C'est là que réside l'important potentiel d'augmentation de l'efficacité énergétique. La quantité d'énergie d'entraînement de la pompe ainsi économisée peut être calculée en utilisant les lois de la proportionnalité.

### Les lois de proportionnalité

Les trois lois suivantes s'appliquent à la pompe:

- Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \dot{V}_2 = \dot{V}_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

- La hauteur de refoulement est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

- La consommation d'énergie est proportionnelle à la puissance cubique de la vitesse de rotation

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Le débit volumique maximal n'est requis que quelques jours par an. Même lorsque le débit est réduit à 70%, sans tenir compte des rendements de la pompe et de l'entraînement, la consommation électrique de la pompe diminue à 34% de la puissance nominale.

### Conclusion

Si l'on tient compte des pertes du convertisseur de fréquence et de la détérioration des rendements, la puissance nécessaire pour entraîner la pompe est divisée par plus de deux! Étant donné que le débit volumique de la plupart des systèmes de climatisation est inférieur à 70% de la puissance nominale, une réduction correspondante doit absolument être envisagée.

### Exemple de calcul

L'exemple suivant montre les économies de consommation d'énergie et de coûts réalisées en réduisant le débit volumique en fonctionnement à charge partielle, sans tenir compte de la modification du rendement de la pompe et du moteur électrique.

Données de base:

- Débit volumique de l'eau  $\dot{V}$  40 m<sup>3</sup>/h  
0,011 m<sup>3</sup>/s
- Hauteur de refoulement  $\Delta p_t$  8,6 mCE
- Heures d'exploitation 4000 h/an
- Coûts de l'électricité 0.2 Fr./kWh
- Durée d'exploitation 15 ans
- Rendement des pompes 74 %

Puissance requise de la pompe aux bornes à 100 %:

$$P = \frac{9810 \cdot 0,011 \cdot 8,6}{0,74} = 1254 \text{ W} = 1,25 \text{ kW}$$

Puissance théorique nécessaire à 70 % du débit volumique

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3 \quad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

$$P_2 = 1254 \cdot \left(\frac{70}{100}\right)^3 = 430 \text{ W} = 0,43 \text{ kW}$$

Économie théorique du besoin en électricité:

- Heures de service 4000 h/an
- Total d'exploitation 15 ans
- Total des heures de service 60 000 h
- Puissance à 100 % 1,25 kWh
- Puissance à 70 % 0,43 kWh

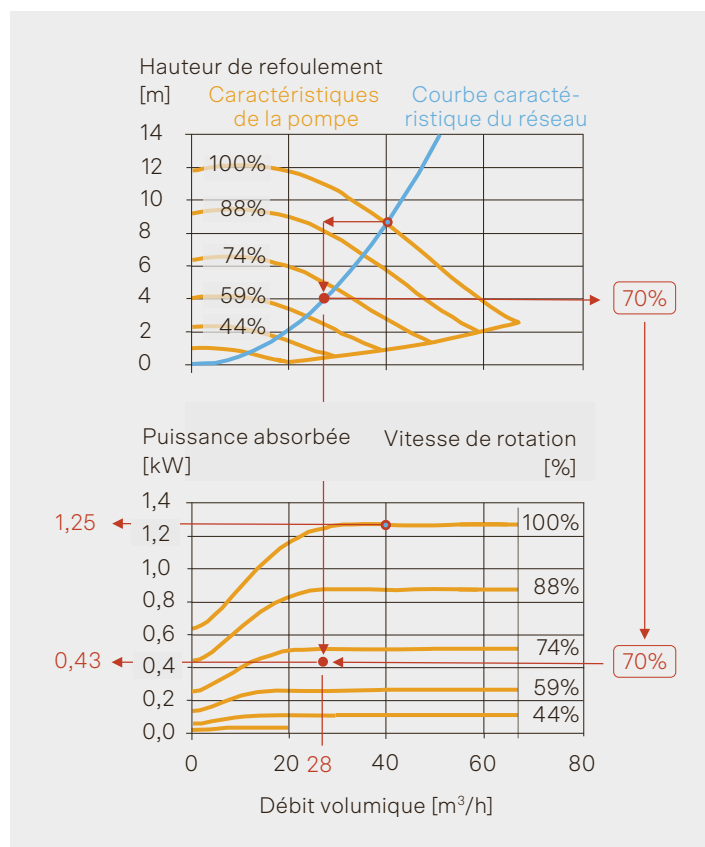
$$\text{Économie} = (1,25 \text{ kW} - 0,43 \text{ kW}) \cdot 60\,000 \text{ h} = 49\,200 \text{ kWh}$$

Économie des coûts sur toute la durée de fonctionnement d'une pompe:

$$\text{Économie} = 49\,200 \text{ kWh} \cdot 0,2 \text{ Fr./kWh} = 9840 \text{ Fr.}$$

Les économies effectives sont inférieures (environ 15 à 20%) en raison du convertisseur de fréquence et des pertes de rendement de la pompe et du moteur électrique.

Illustration 11.9:  
Caractéristiques de la pompe avec point de fonctionnement à 70% de débit volumique.





## 11.5 Approfondissement 3: Système global

### États de fonctionnement en été, automne, hiver et printemps

Dans le Chapitre sur l'hydraulique, l'illustration 8.27 décrit un exemple de système avec exploitation du froid et de la chaleur. L'exemple décrit un système que l'on est plus susceptible de trouver dans des installations plus grandes (à partir de 100 kW d'exploitation du froid et de la chaleur). Pour de plus petites installations (p. ex. les installations sans champ de sondes géothermiques), les éléments

et les conduites correspondants ne sont pas nécessaires.

Les pages suivantes décrivent le fonctionnement de l'installation au cours des quatre saisons (été, automne, hiver et printemps). Les illustrations 11.11 à 11.14 présentent en semi-transparence les systèmes, éléments ou cycles qui ne sont pas en fonctionnement.

### A: Voici comment fonctionne l'ensemble de l'installation en été

#### Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 1 <sup>re</sup> priorité: | Pour la production d'eau chaude sanitaire      |
| 2 <sup>e</sup> priorité:  | Pour la régénération de la sonde géothermique  |
| 3 <sup>e</sup> priorité:  | Évacuation de la chaleur via l'aéroréfrigérant |

#### Sonde géothermique

Stocker la chaleur avec un niveau de température élevé

#### Chauffage et eau chaude sanitaire

Eau chaude sanitaire: Chauffée avec la chaleur de la machine frigorifique-thermique et de la pompe à chaleur

Chauffage: Pas de besoin de chaleur. La chaudière à mazout ou à gaz est déclenchée.

#### Côté eau froide de la machine frigorifique-thermique

Machine A: Température de l'eau froide 16 °C

Machine B: Température de l'eau froide 10 °C

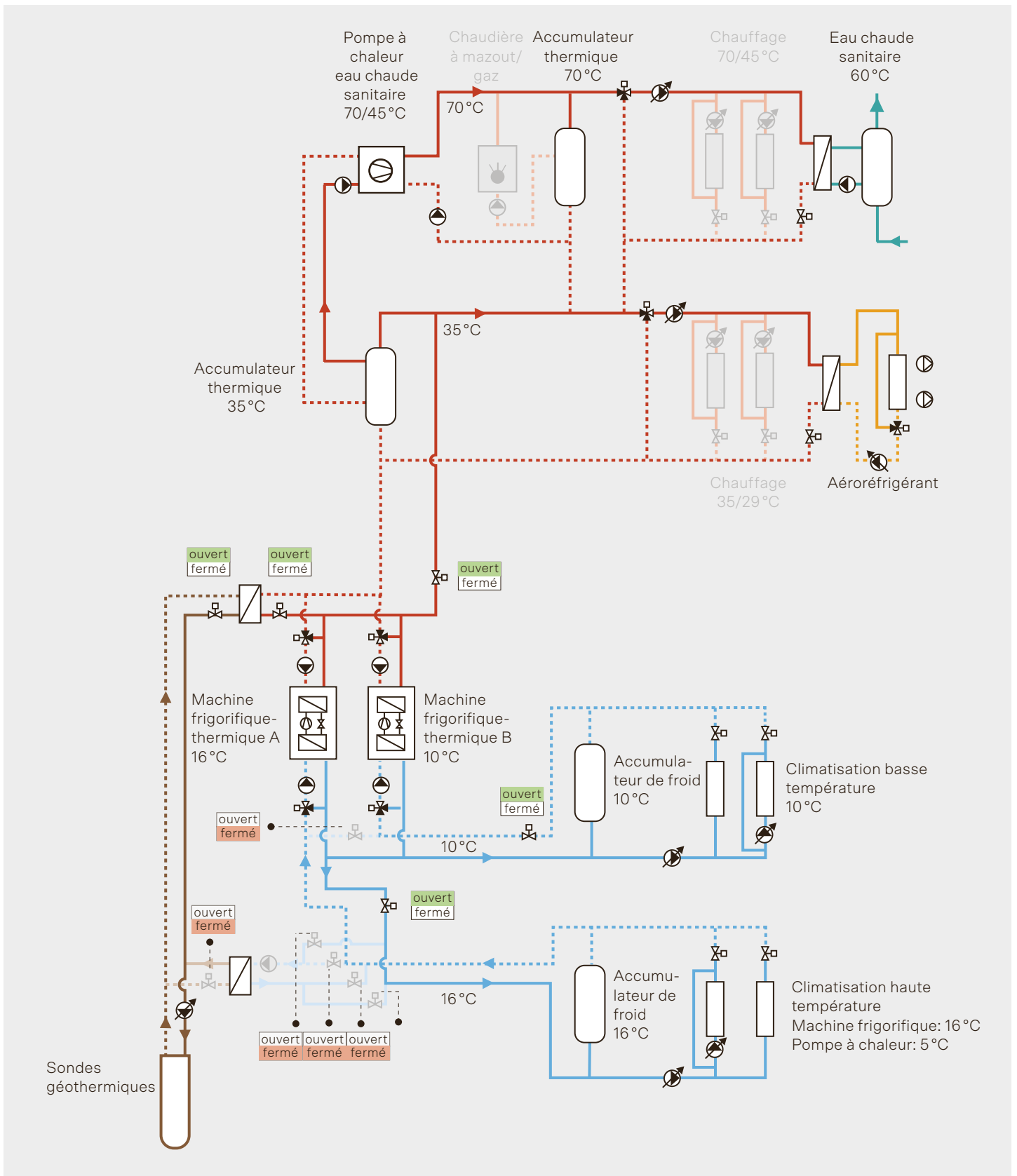


Illustration 11.10:  
Mode été.

## **B: Voici comment fonctionne l'ensemble de l'installation en automne**

### **Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Pour le chauffage à 35 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Via une pompe à chaleur pour le chauffage à 70 °C ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire.
- 3<sup>e</sup> priorité: Pour la régénération de la sonde géothermique  
L'objectif étant de ne pas évacuer la chaleur via l'aéroréfrigérant.

### **Sonde géothermique**

Stocker la chaleur à un niveau de température élevé.

### **Chauffage et eau chaude sanitaire**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique
  - A: directement par le système de chauffage à 35 °C
  - B: via la pompe à chaleur dans le système de chauffage à 70 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Si possible, se passer de la chaudière à mazout ou à gaz (déclencher).

### **Côté eau froide de la machine frigorifique-thermique**

- Machine A: Température de l'eau froide à 16 °C
- Machine B: Température de l'eau froide à 10 °C

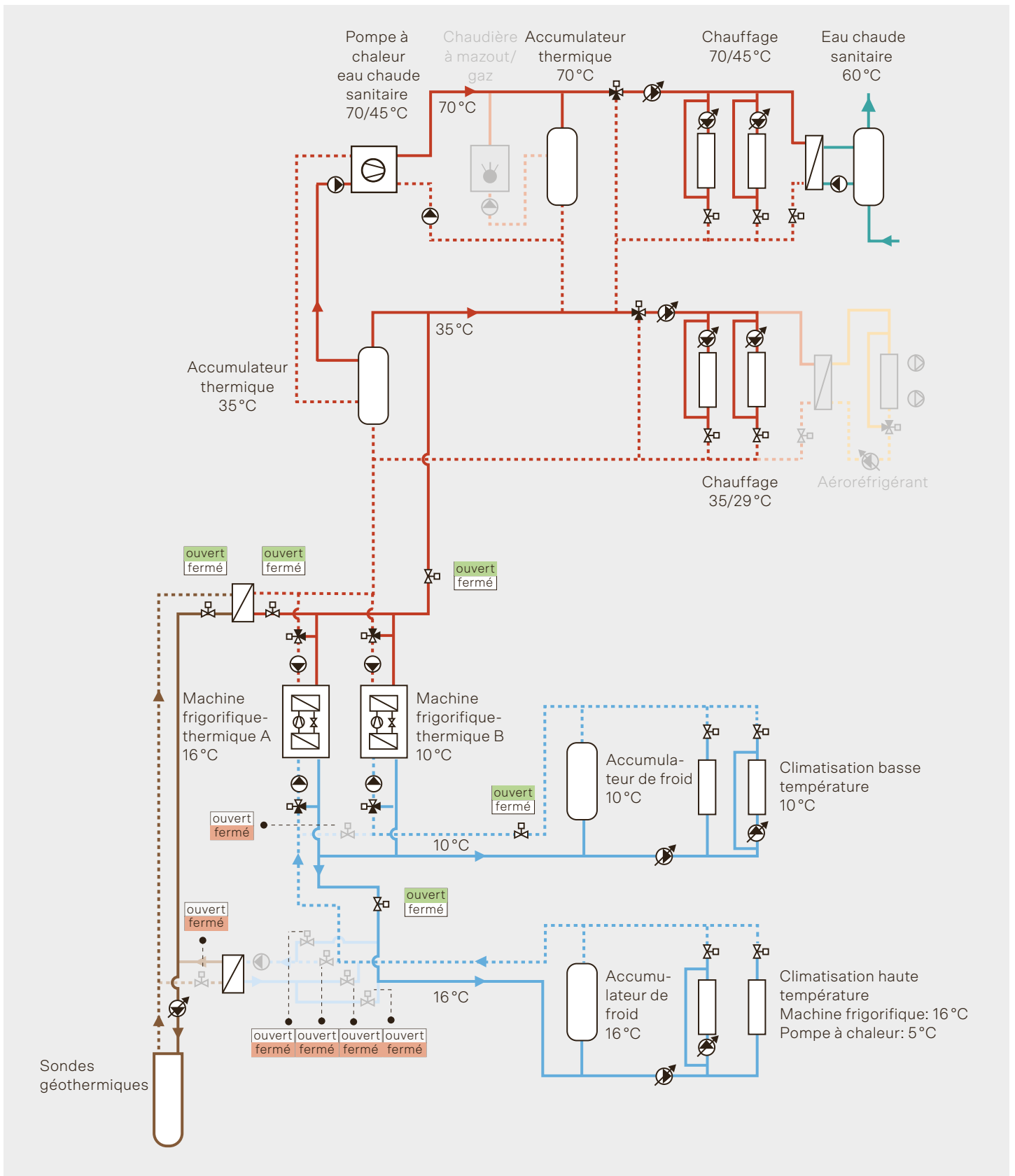


Illustration 11.11:  
Mode automne.

## **C: Voici comment fonctionne l'ensemble de l'installation en hiver**

### **Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Pour le chauffage à 35 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Via une pompe à chaleur pour le chauffage à 70 °C ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire
- 3<sup>e</sup> priorité: Pour la régénération de la sonde géothermique  
L'objectif est de ne pas évacuer la chaleur via l'aéroréfrigérant.

### **Sonde géothermique**

Extraction de la chaleur pour la machine frigorifique A.

### **Chauffage et eau chaude sanitaire**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Chaleur de la machine frigorifique-thermique à 35 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Chaleur de la MFT via la PAC à 70 °C
- 3<sup>e</sup> priorité: Chaudière à mazout ou à gaz

### **Côté eau froide Machine frigorifique-thermique**

- Machine A: Fonctionne comme une pompe à chaleur avec une température d'eau froide de 5 °C La sonde géothermique et les consommateurs de froid servent de source de chaleur.
- Machine B: Température de l'eau froide à 10 °C

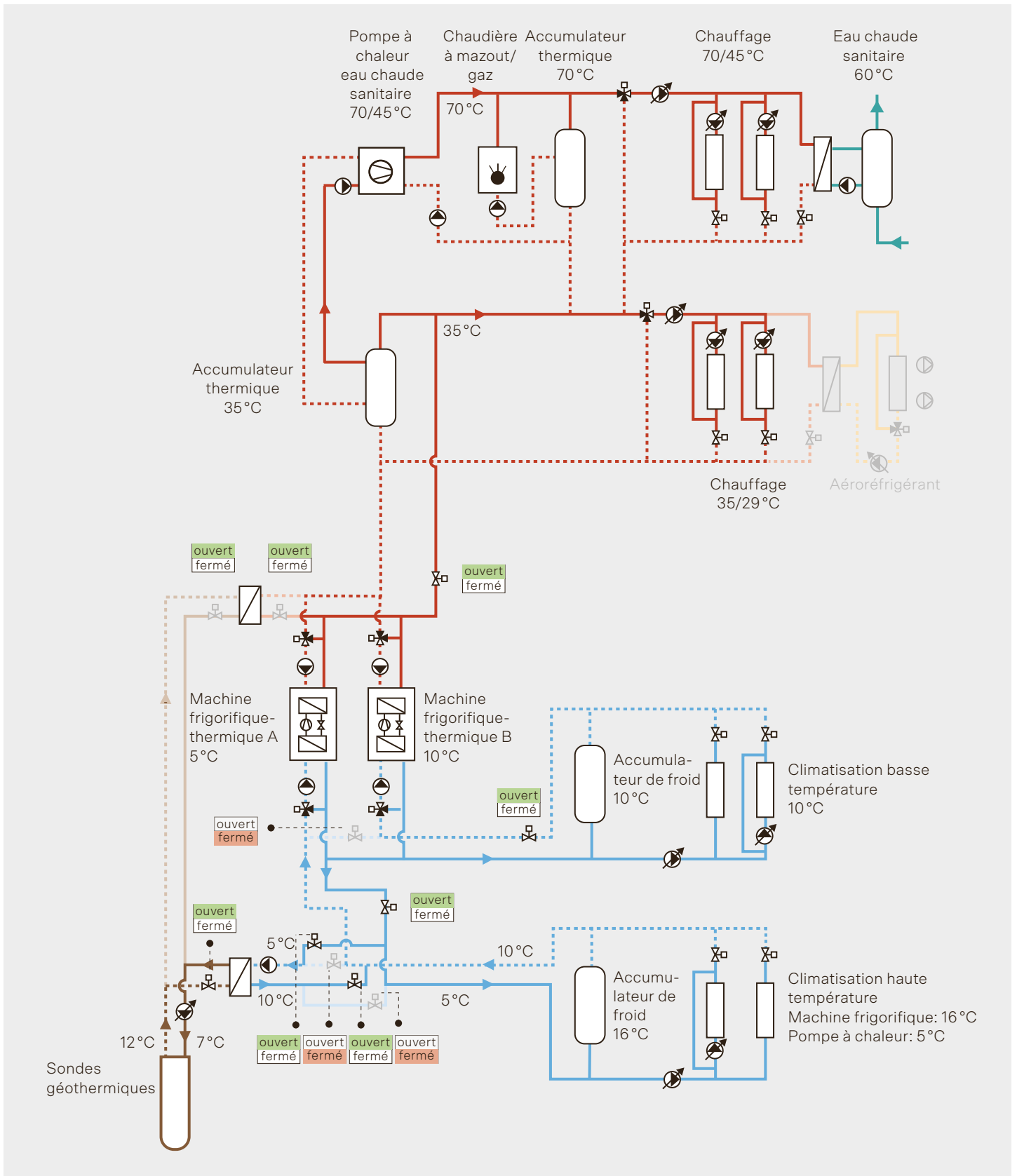


Illustration 11.12:  
Mode hiver.

## **D: C'est ainsi que l'installation globale fonctionne au printemps**

### **Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Pour le chauffage à 35 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Via une pompe à chaleur pour le chauffage à 70 °C ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire  
L'objectif est de ne pas évacuer la chaleur via l'aéroréfrigérant.

### **Sonde géothermique**

Stocker la chaleur avec un niveau de température bas

### **Chauffage et eau chaude sanitaire**

- 1<sup>ère</sup> priorité: Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique à 35 °C
- 2<sup>e</sup> priorité: Exploitation de la chaleur de la machine frigorifique-thermique via la pompe à chaleur dans le réseau à 70 °C pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire.
- 3<sup>e</sup> priorité: Si possible, renoncer la chaudière à mazout ou à gaz (déclencher).

### **Côté eau froide de la machine frigorifique-thermique**

- Machine A: Déclenchée  
Le refroidissement du réseau de froid haute température (16 °C) se fait directement par les sondes géothermiques
- Machine B: Température de l'eau froide à 10 °C

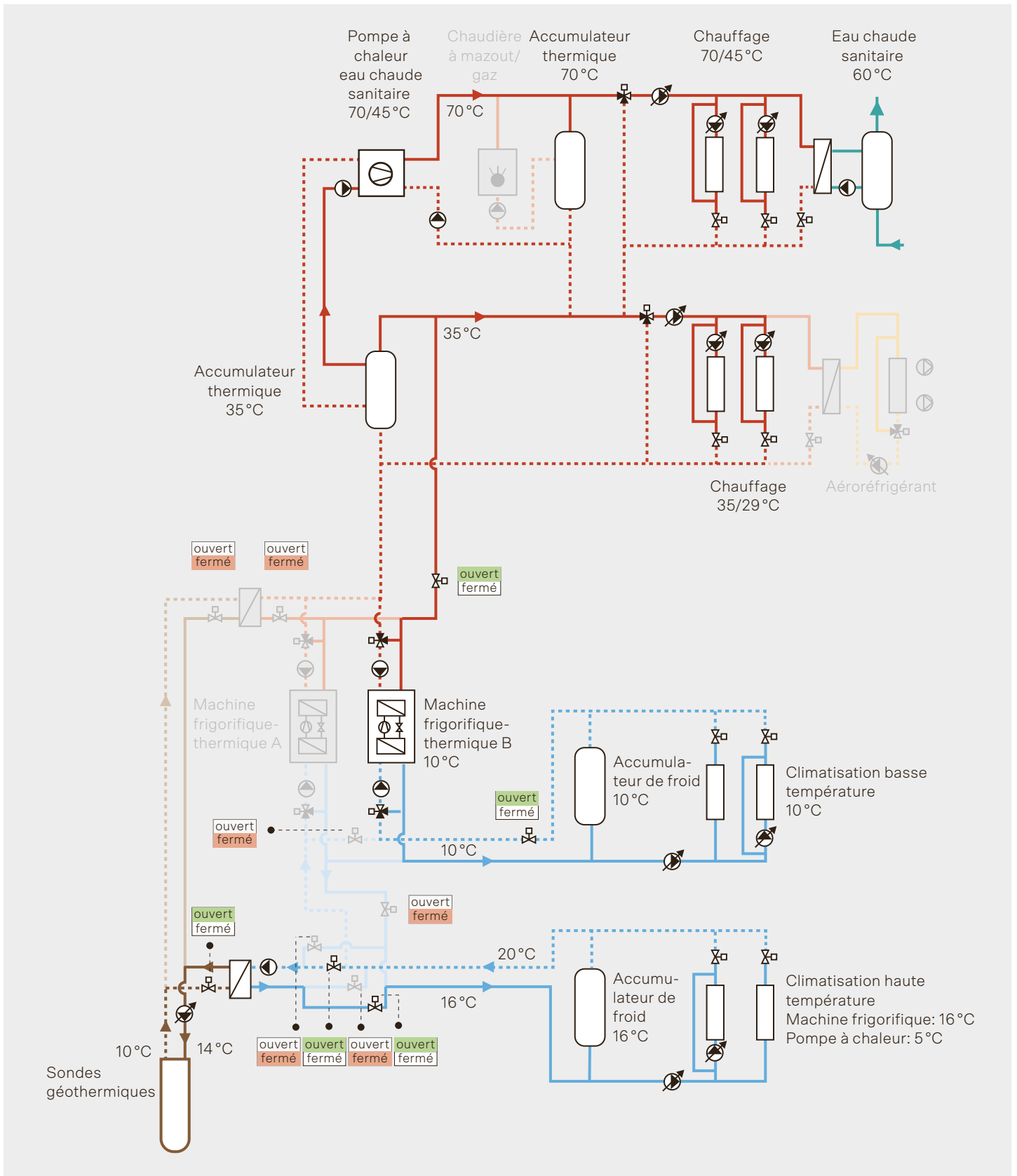


Illustration 11.13:  
Mode printemps.



## 11.6 Approfondissement 4: Interface relative à la gestion technique du bâtiment

Pour intégrer la machine frigorifique dans un système de gestion technique du bâtiment, il faut définir les interfaces entre les deux systèmes (point de données), la direction de leurs signaux (entrée ou sortie) et leur type de signal (analogique, numérique, contact libre de potentiel).

L'illustration 11.14 montre les interfaces les plus importantes et leurs signaux pour une machine frigorifique d'une puissance de 200 kW.

### Légende

DO	Digital Output	Sortie numérique
DI	Digital Input	Entrée numérique
AO	Analog Output	Sortie analogique
AI	Analog Input	Entrée analogique
PFD	Potential free	Contact libre de potentiel

(dans cet exemple, il n'y a pas de PFD)

Désignation des interfaces	Signal	Remarque
<b>Entrées</b>		
Libération	DI	
Commutation sur utilisation de la chaleur	DI	
Retour Pompe principale Froid	DI	
Retour Pompe aëroréfrigérant	DI	
Commutation à la valeur de consigne Température du circuit de froid	DI	p. ex. fonctionnement de l'accumulateur de froid été-hiver
Surveillance de la tension	DI	usuel uniquement sur les installations du processus
Surveillance de l'interrupteur principal	DI	
Contrôleur de débit	DI	en partie intégré dans la machine frigorifique
Interrupteur de secours	DI	
Décalage à la valeur de consigne Température du circuit de froid	AI	
Limitation de puissance	AI	
<b>Sorties</b>		
Alarme collective	DO	
Alarme préliminaire, avertissement informel	DO	
Alarme par circuit de froid	DO	
Alarme avec quittance manuelle	DO	
Panne du démarrage du moteur	DO	
Alarme haute pression	DO	
Alarme avec quittance automatique	DO	p. ex. basse pression, débit (l'alarme manuelle avec témoin lumineux documente l'annonce de l'alarme après quittance)
Annonce opérationnelle de la machine frigorifique (évent. pour chaque compresseur)	DO	
Puissance maximale atteinte	DO	
Consommation d'électricité	AO	en % de $I_{max}$ .
Pression d'évaporation	AO	
Pression de condensation	AO	

Illustration 11.14:  
Exemple d'interfaces  
et de leurs signaux.  
Les interfaces avec  
les autres compo-  
sants de l'installation  
doivent être traitées  
de manière ana-  
logue.

## 11.7 Approfondissement 5: Sous-refroidissement

Dans les machines frigorifiques à compression, tout fluide frigorigène doit, en principe, être sous-refroidi afin d'éliminer les bulles de gaz avant la vanne d'expansion (sous-refroidissement «normal»). En fonction du rapport de pression, une partie du fluide frigorigène s'évapore en amont du détendeur. La pression du condenseur et le cheminement des tuyaux vers le détendeur jouent un rôle à cet égard. En outre, une augmentation de la hauteur de la conduite de liquide vers le détendeur peut entraîner une évaporation spontanée.

Le fluide frigorigène évaporé avant le compresseur – appelé «flashgas» – est à nouveau comprimé dans le compresseur. Comme il s'est déjà évaporé, il ne contribue pas à la puissance de refroidissement. Cependant, cela nécessite de l'énergie électrique pour la compression, ce qui signifie que le système fonctionne moins efficacement (le  $COP_{\text{Froid}}$  devient plus petit).

Pour que l'installation fonctionne de manière efficace sur le plan énergétique, la teneur en flashgas doit être maintenue aussi faible que possible. Donc, en sous-refroidissant le fluide frigorigène issu de l'expansion, la «part de flashgas» est diminuée. En outre, il faut s'assurer que les assises de clapets ne sont pas endommagées par les effets de cavitation.

Même avec un sous-refroidissement «normal», l'efficacité énergétique est automatiquement améliorée de 1,5 à 2,5%. En outre, les ingénieurs en ma-

chines et les planificateurs astucieux refroidissent davantage le fluide frigorigène. Cela permet d'augmenter la puissance de refroidissement (ou de choisir un compresseur plus petit), d'améliorer l'efficacité et de travailler avec de plus petites quantités de fluide frigorigène. En outre, un sous-refroidissement ciblé augmente la fiabilité opérationnelle. Cependant, ce sous-refroidissement supplémentaire du fluide frigorigène n'a d'effet que s'il a lieu après le réservoir de ce fluide.

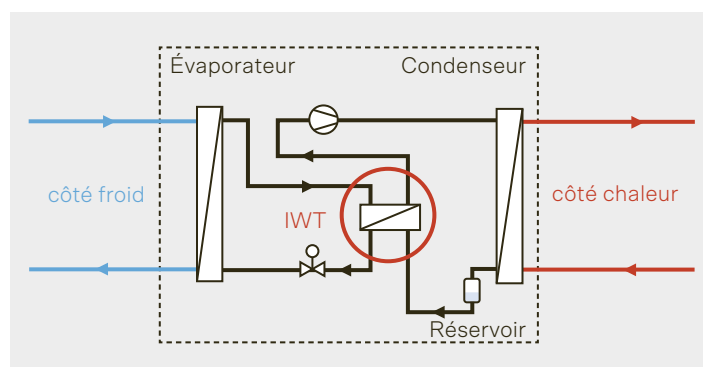
### 1. Avec un échangeur de chaleur interne (IWT)

L'exposant adiabatique permet de déterminer dans quelle mesure un fluide frigorigène est adapté à un sous-refroidissement avec un IWT. Un sous-refroidissement du côté de la haute pression entraîne en effet une surchauffe du côté de la basse pression, qui amorce la condensation. Plus l'exposant adiabatique est élevé, plus la température de compression finale est élevée et moins un fluide frigorigène est adapté.

En général, on dit que les fluides frigorigènes particulièrement adaptés à un sous-refroidissement possèdent un exposant adiabatique autour de 1,0.

Malheureusement, les fluides frigorigènes actuellement utilisés dans le froid de climatisation possèdent des exposants adiabatiques ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) nettement supérieurs, de 1,10 (R134a) à 1,30 ( $\text{CO}_2$ ). Par conséquent, du fait de leurs propriétés thermiques, ils ne conviennent au sous-refroidissement avec un IWT que sous certaines conditions.

Illustration 11.15:  
Sous-refroidissement avec un échangeur de chaleur interne.



#### Le sous-refroidissement améliore l'efficacité

Lorsque le sous-refroidissement est effectué avec un échangeur de chaleur interne, l'efficacité de l'installation peut être augmentée de 2,5 à 5%. Avec un sous-refroidissement externe cela peut atteindre 23%.

**Exemple de fluide frigorigène R513A:** Un sous-refroidissement de 5 K à une température de condensation de  $45^\circ\text{C}$  et une température d'évaporation de  $7^\circ\text{C}$  augmentent le COP de 5%.

## 2. Avec un circuit économiseur

Dans un circuit économiseur, une (petite) partie du fluide frigorigène (flux partiel) est dérivée après le condenseur et détendue séparément. Après la détente, le fluide frigorigène du flux partiel a une température basse. Avant l'évaporateur, le fluide frigorigène du flux principal est alors encore refroidi (sous-refroidi) par le flux partiel froid.

Le flux partiel détendu est ajouté au flux principal (gaz d'aspiration) avant le compresseur, ce qui entraîne une légère baisse de la température des gaz d'aspiration. De cette façon, le problème d'une température finale de compression trop élevée peut être évité.

## 3. Avec un échangeur de chaleur externe

Dans le froid de climatisation, on oublie souvent que le sous-refroidissement est exécuté par un échangeur de chaleur externe. Le fluide frigorigène est ainsi sous-refroidi avec l'eau froide ou chaude (p. ex. préchauffage de l'eau chaude).

Sinon, on place l'échangeur de chaleur externe directement sous le condenseur (aéroréfrigérant secondaire) ce qui permet de sous-refroidir le fluide frigorigène avec l'air extérieur. Une autre possibilité consiste à sous-refroidir avec un registre intégré avant le condenseur avec de l'air.

Illustration 11.17 (en haut): Sous-refroidissement avec un échangeur de chaleur refroidissant avec de l'eau ou un fluide frigorigène.

Illustration 11.18 (au milieu): Sous-refroidissement avec un échangeur de chaleur refroidissant avec l'air.

Illustration 11.19 (en bas): Sous-refroidissement avec une batterie de sous-refroidissement refroidissant avec l'air.

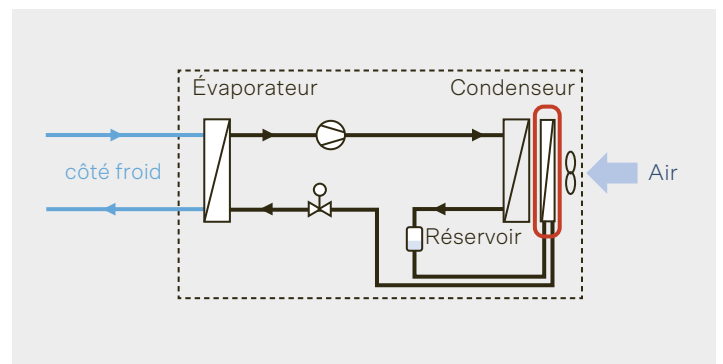
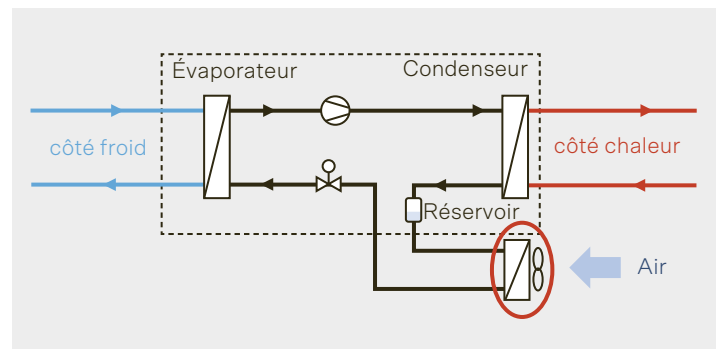
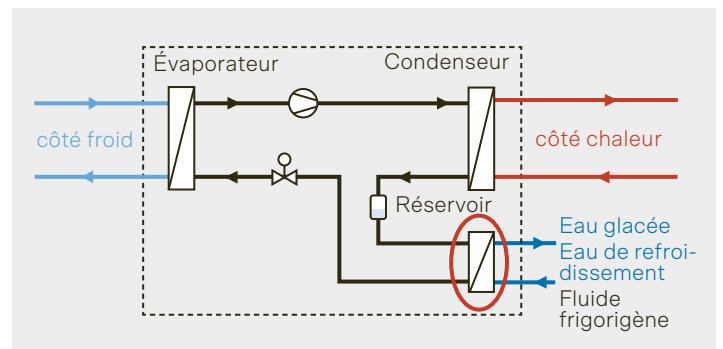
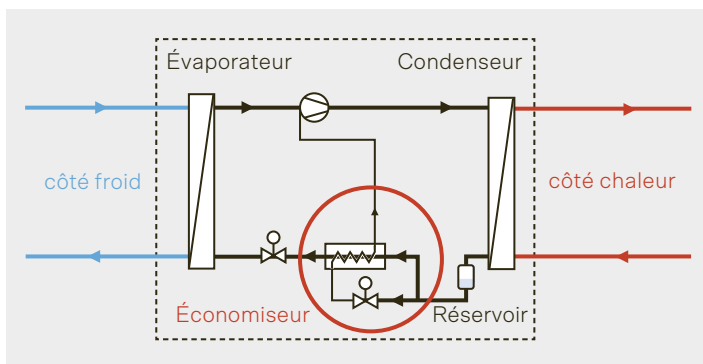


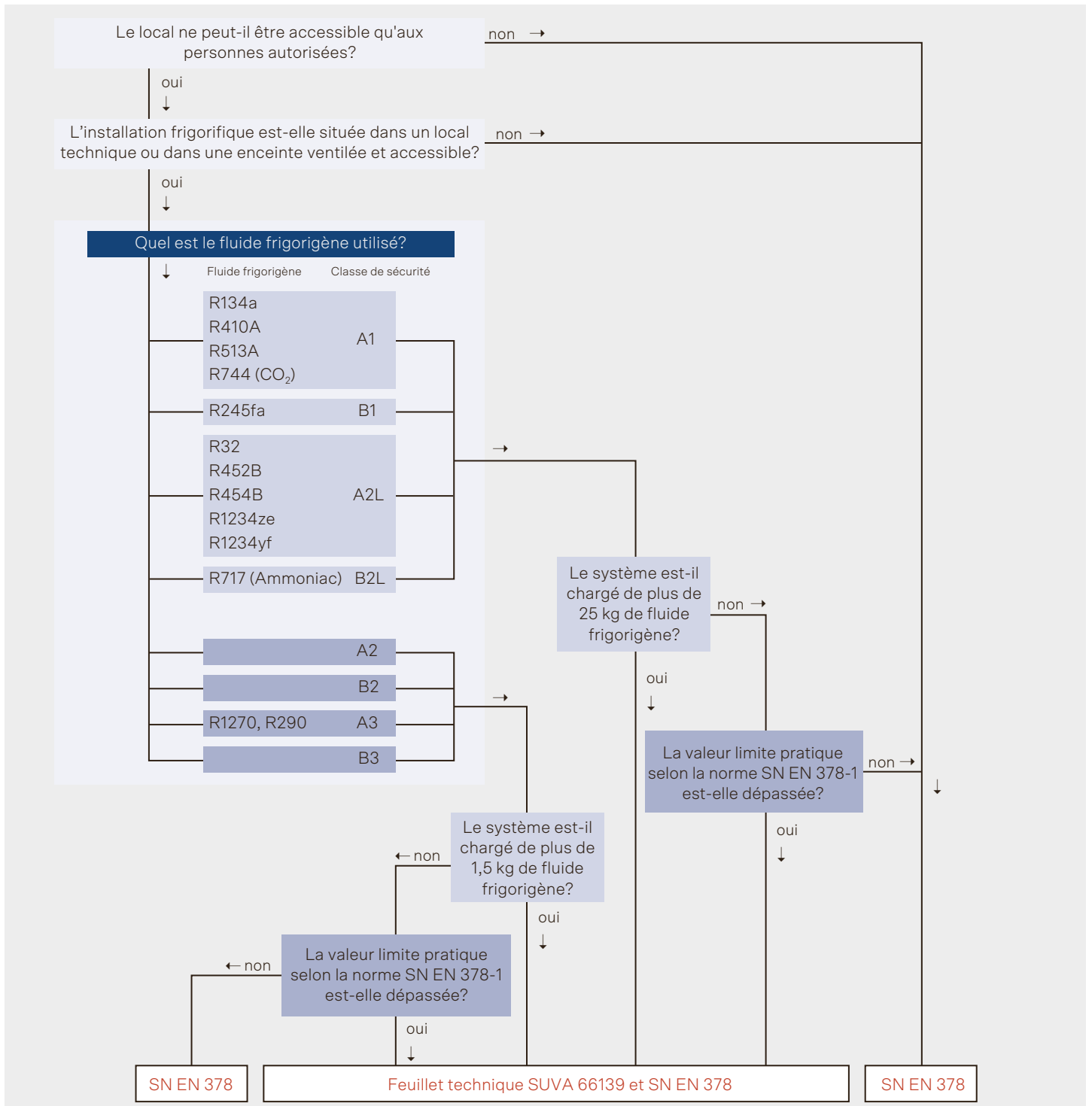
Illustration 11.16:  
Sous-refroidissement avec économiseur



### 11.8 Approfondissement 6: Arbre de décision relatif à la norme EN 378 et au Feuille technique SUVA 66139

cées par les exigences de la SUVA (sécurité au travail). L'arbre de décision aide à déterminer quelles exigences respecter dans quel cas.

Selon la configuration de l'espace et le fluide frigorigène, les exigences de sécurité de la norme SN EN 378 sont renfor-



## 11.9 Approfondissement 7: Fluides frigorigènes – Substitution et contrôle d'étanchéité

### Substitution de fluides frigorigènes qui ne sont plus autorisés

Les installations fonctionnant avec un fluide frigorigène qui ne doit plus être utilisé (p. ex. R22) peuvent continuer à être exploitées si elles sont étanches. Dans le cas d'une perte de fluide frigorigène (p. ex. par une fuite), celui-ci doit être intégralement récupéré et remplacé par un fluide frigorigène autorisé. L'âge de l'installation ainsi que les réparations prévisibles sont déterminants dans la décision de savoir si une conversion doit être envisagée ou si l'installation doit être remplacée.

### Conversion pour le fonctionnement avec un fluide frigorigène de substitution

La conversion pour le fonctionnement avec un fluide frigorigène de substitution approprié exige éventuellement des adaptations dans le circuit frigorifique ainsi que le remplacement de l'huile de la machine frigorifique et des vannes d'injection. Le système frigorifique doit en outre être rincé et nettoyé. Dans les cas les plus complexes, il peut être nécessaire de remplacer le compresseur.

### Transformation de l'installation

Lorsque le compresseur doit être remplacé, il convient toujours de vérifier si l'installation transformée est désormais classifiée comme une nouvelle installation ou comme une installation existante. En fonction de cela, les prescriptions des nouvelles installations frigorifiques ou des installations frigorifiques existantes s'appliqueront. Les modifications suivantes n'impliquent généralement pas de réévaluation:

- les réparations, y compris le remplacement à l'identique des composants existants défectueux;

- le remplacement à l'identique de l'intégralité de l'installation sous garantie;
- le déplacement de quelques mètres d'une installation dans son lieu d'emplacement;
- le remplacement du fluide frigorigène par un autre fluide frigorigène, y compris le remplacement de petites pièces telles que des joints ou des vannes d'expansion, lorsque ni le compresseur, ni le condenseur, ni l'évaporateur de l'installation ne sont modifiés.

Les détails à ce sujet peuvent être consultés dans l'Aide à l'exécution de l'OFEV (point 2.3.6).

### Exceptions dans les transformations pour améliorer l'efficacité énergétique

Les mesures permettant d'accroître significativement l'efficacité énergétique des installations ne conduisent pas à une réévaluation de l'installation frigorifique. Cela concerne notamment:

- l'installation d'un compresseur avec convertisseur de fréquence
- l'ajout pour l'utilisation de la chaleur du circuit secondaire
- l'installation d'un sous-refroidisseur de fluide frigorigène
- le remplacement de l'évaporateur ou du condenseur par des composants plus efficaces sur le plan énergétique
- l'installation d'une vanne d'expansion électronique

**Attention:** Cette réglementation n'est pas applicable aux installations contenant des fluides frigorigènes avec un PRG de plus de 1500 (p. ex. R410A ou 407C). Les détails à ce sujet peuvent

	Installations assemblées sur place	Installations et appareils compacts fabriqués en usine
Premier contrôle après la mise en service	2 ans	6 ans
Deuxième contrôle après la mise en service	1 an après le premier contrôle	4 ans après le premier contrôle
Contrôles ultérieurs	annuels	tous les 2 ans

être consultés dans l'Aide à l'exécution de l'OFEV (point 2.3.6).

#### **Contrôle d'étanchéité**

D'un point de vue technique, les contrôles doivent avoir lieu au moins dans les cycles suivants (Source: Installations et appareils avec fluide frigorigène: Exploitation et maintenance, Aide à l'exécution de l'OFEV relatives aux prescriptions sur le carnet d'entretien, le contrôle des fuites et l'obligation d'annoncer. État 2020)

## 11.10 Index des mots-clés

### Symboles

Méthode (n+1) 39

### A

Accumulateur 122  
Accumulateur d'eau glacée 134  
Accumulateur de glace 150  
Accumulateur d'énergie 134  
Accumulateur-tampon 134  
Accumulateur technique 134  
Accumulateur thermique à court terme 109  
Aéroréfrigérant par évaporation 113  
Aéroréfrigérant sec 113  
Aqua-cooling 96  
Augmentation de la température de condensation 102

### B

Besoin en froid 46

### C

Centres de calcul 178  
Chaleur latente 20  
Chaleur sensible 20  
Chauffe-eau pompes à chaleur 103  
Circuit de mélange 127  
Circuit d'étranglement 127  
Circuit d'injection 127  
Circuits hydrauliques 121  
Circuits séparés 82  
Coefficient de performance 24  
Coefficient de performance saisonnier européen (ESEER) 178  
Coefficient de rendement 24  
Commande 153  
Comportement en charge partielle 181  
Compresseur 63  
Condensation directe 153  
Condenseur 63  
Conduite 146  
Confort 90  
Construire sans refroidissement 60  
Contrôle d'étanchéité 58  
Convecteurs de climatisation 91

$COP_{\text{Chaleur}}$  175  
 $COP_{\text{Froid}}$  175  
 $COP_{\text{Froid+Chaleur}}$  183  
Cycle de Carnot 24

### D

Décalage de la valeur de consigne 159  
Déshumidification contrôlée 89  
Déshumidification partielle 90  
Désurchauffe des gaz chauds 106  
Détendeur 63  
Détendeur électronique 79  
Détendeur thermostatique 79, 166  
Détente sèche 73  
Diagramme log p,h 22  
Disponibilité 38  
Dispositifs de décharge de pression 80  
Dispositifs de sécurité 164

### E

Eau chaude sanitaire 103  
Échangeur de chaleur 63  
Échangeur de chaleur noyé 73  
EER+ 178  
Efficacité énergétique 173  
Éléments de construction thermoactifs 92  
Émissions sonores 51  
Energy Efficiency Ratio (EER) 175  
Enthalpie 22  
Équilibrage hydraulique 123  
Évaporateur 63  
Évaporateur à air direct 74  
Évaporation directe 153

### F

Facteur de gain électrothermique (ETV) 179  
Facteur d'encrassement 72  
Fluide caloporteur 28  
Fluide frigorigène 28, 208  
Free-cooling 97, 111, 140

### G

Géo-cooling 96  
Glycol 149

**I**

Interfaces 154  
Isentropique 23

**L**

Limitation de la température minimale 160  
Limites du système 176  
Liste de contrôle: conception 49

**M**

Machines frigorifiques à absorption 85  
Maintenance 58  
Matériaux d'isolation 147  
Mélange eau-glycol 146  
Mesure de l'énergie 45  
Mesures de sécurité 42  
Mise en service 57

**O**

Optimisation de l'exploitation 58

**P**

Phases SIA 51  
Pierres d'achoppement 53  
Plafonds rafraîchissants 92  
Pompe à vitesse régulée 125  
Pompes 122  
Production frigorifique compacte montée sur la toiture 105

**Q**

Quantité de fluides frigorigènes 42

**R**

Réception 56  
Réception de garantie 45  
Recirculation indésirable de l'air 112  
Redondance 40  
Refroidissement de confort 90  
Refroidisseur à circulation d'air 91  
Régénération du sol 110  
Régulation 153  
Régulation de la température 157  
Régulation progressive de la puissance 157  
Régulation séquentielle 159  
Réseau de conduites 122

**S**

Sans déshumidification 90  
Séparation du système hydraulique 130  
Sondes 167  
Sources de refroidissement 87  
Sous-refroidissement 205  
Stockage saisonnier de la chaleur 110  
Systèmes de refroidissement de surface 92

**T**

Températures d'eau glacée 46  
Températures de l'eau glacée 88  
Température utile 87  
Temps de course 126  
TEWI 33  
Types de construction des compresseurs 68

**U**

Utilisation de la chaleur 183

**V**

Vannes 122  
Volume spécifique 23



**Gestion et  
facturation  
de l'énergie –  
plus facile que  
jamais.**



### **Belimo Energy Valve™ et compteur d'énergie thermique**

Belimo est le premier fournisseur mondial de servomoteurs, de vannes de régulation, de capteurs pour les installations de chauffage, de ventilation et de climatisation. La gamme de produits IoT avec sa nouvelle Belimo Energy Valves™ MID, regroupés en un seul produit la gestion de l'énergie, ainsi que sa mesure pour la facturation.

La connexion au Cloud Belimo offre une extension de garantie de deux ans et une série d'avantages vers toujours plus de transparence. En conservant le double numérique de l'Energy Valve dans le Cloud, les utilisateurs, peuvent interagir directement avec leurs données tout en ayant accès aux paramètres. Ils peuvent également plus facilement faire appel à leurs partenaires favoris pour la facturation, les services d'analyse, ainsi que l'optimisation énergétique de leur installation.

Investissez-vous prochainement dans la pierre ? Laissez-nous vous offrir les meilleures solutions du marché, ceci grâce aux technologies de l'information qui répondent aux attentes des utilisateurs, et aident les planificateurs spécialisés.

**BELIMO Automation SA**  
+41 26 460 83 10, [vente@belimo.ch](mailto:vente@belimo.ch), [www.belimo.ch](http://www.belimo.ch)



**BELIMO**<sup>®</sup>

# Bei Kälte muss man zusammenstehen.

Aber auch bei Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär, Elektro, Gebäudeautomation, Brandschutz, Energieberatung und EnergyMonitoring. [www.antecegroup.ch](http://www.antecegroup.ch)

**BKW ANTEC GROUP**

**ahochn AG**  
**Aicher, De Martin, Zweng AG**  
**Balzer Ingenieure AG**  
**enerpeak AG**  
**LAMI SA**  
**MRI Marcel Rieben Ingenieure AG**



**PROPANE**



Respectueux de l'environnement

## Groupes frigorifiques avec propane

[cta.ch/groupes-frigorifiques-propane](http://cta.ch/groupes-frigorifiques-propane)

Groupes frigorifiques au propane et pompes à chaleur industrielles haut-de-gamme et sans danger. Flexibilité grâce à un système modulaire. Avec compresseur à piston ou à vis. Avec réfrigérant respectueux de l'environnement. Jusqu'à une puissance frigorifique de 1200 kW, refroidissement à l'air ou à l'eau. Produit standard ou sur-mesure.

**40**  
ANS  
expérience



## Des solutions d'efficacité énergétique de la technique du bâtiment

**Chauffage • Ventilation/Climatisation • Sanitaire  
Régulation • Optimisation énergétique**



[engie.ch/fr/genie-technique-du-froid](http://engie.ch/fr/genie-technique-du-froid) • Tél. 0800 888 788

**#Act  
With  
ENGIE**



# ENIP AG

Klima-, Kälte- & Wärmepumpentechnik

Als Anbieter und Hersteller von Betriebs-, Gebäude-, Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kältetechnik decken wir sämtliche Dienstleistungen in diesen Bereichen ab. Wir denken und handeln energieeffizient, nachhaltig, intelligent und leisten einen ganzheitlichen, professionellen Service.

**KLIMATECHNIK - KÄLTETECHNIK - WÄRMEPUMPENTECHNIK - REGELTECHNIK**

**IOT PLATTFORM - UMWELTSCHUTZ - SERVICE UND INSTANDHALTUNG**



Mit dem IMP Regler erhalten Sie ein Intelligentes Gebäudemanagement System, welches sich schnittstellenlos betreiben lässt. Unser System ist so modular aufgebaut, dass es Ihnen somit überlassen wird, ob Sie nur ein Gerät oder gleich Ihr ganzes Gebäude damit steuern, regulieren und betreiben wollen.



**ENERGIEEFFIZIENT · NACHHALTIG · INTELLIGENT · PROFESSIONELL**

**ENIP AG BAHNSTRASSE 60 - 8105 REGENSDORF - WWW.ENIP.CH - +41 44 843 33 33**



# Johnson Controls

Kälte- und Klimatechnik mit natürlichen Kältemitteln

Johnson Controls Systems & Service GmbH  
Hauptsitz Zürich, Kältetechnik  
Grindelstrasse 19, 8303 Bassersdorf, Schweiz  
Tel: +41 44 838 44 11  
E-Mail: info-switzerland@jci.com





Seit 47 Jahren Experten  
für Kälte-, Klima- und  
Wärmepumpentechnik.  
[www.kapag.ch](http://www.kapag.ch)



R1234ze



R290



R744

**KAPAG Kälte-Wärme AG**

8964 Rudolfstetten

☎ 044 918 72 50

[www.kapag.ch](http://www.kapag.ch)

## eChiller

Kältetechnik  
mit Zukunft

Wasser (R718) –  
das natürliche  
Sicherheits-  
kältemittel

### Gesetz?

- ChemRRV 814.81  
keine Einschränkung
- SN EN387 1-4  
Sicherheitsgruppe A1

### Kosten?

- Kostengünstigstes  
Kältemittel
- Geringe  
Energiekosten

### Nachhaltigkeit?

- 100 % natürliches  
Kältemittel
- Öl-freier Betrieb



### Mehr Infos unter:

Klima Kälte Kopp AG • 8953 Dietikon • Tel. +41 (0)43 322 32 32 • [www.3-k.ch](http://www.3-k.ch)



**KLIMA KÄLTE KOPP AG**



# Einfach Leplan. Der Kälteplaner

UNSER FOKUS LIEGT AUF DER KÄLTE. Als Ingenieurbüro sind wir Ihr neutraler Partner für die Beratung von Eisbahnprojekten, Gesamtenergiekonzepten und Kältetechnik.

[Leplan AG](#) | [8400 Winterthur](#) | [6004 Luzern](#) | [www.leplan.ch](#)



**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*

Wenn Gebäude kommunizieren,  
verstehen wir ihre Sprache.

Die Digitalisierung macht's möglich  
#CreatingPerfectPlaces

Rund 90 Prozent des Lebens verbringen wir in Gebäuden. Sie sind mehr als nur Orte, an denen wir arbeiten und wohnen. Gebäude liefern Daten, sagen uns wie sie sich fühlen, was ihnen fehlt. Mit unserem Know-how in Safety, Security und Comfort und unserem ganzheitlichen Portfolio arbeiten wir jeden Tag daran, Gebäude zu verstehen, sie zu optimieren um damit Ihr Leben zu verbessern. Gemeinsam schaffen wir «Perfekte Orte».

[siemens.ch/buildingtechnologies](#)

## Ihr Partner für die Planung von Kälteanlagen

- Bauherrenberatung und -begleitung
- Konzepterstellung
- umfangreiche Erfahrung im Grossdatacenter-Bau
- Vorprojekte
- Bau-Ausführungsprojekte
- QS-Mandate



smcooling gmbh  
Geschäftsinhaber Sepp Manser  
Brülisauerstrasse 51  
9058 Brülisau

Tel. +41 (0)79 217 19 75  
info@smcooling.ch  
www.smcooling.ch

## Weiter denken – Karriere planen!

Wir mögen keine leeren Pläne.  
Vadea Engineering sucht innovative Ideen  
und vielseitiges Expertenwissen für die  
Planung von Energie- und Gebäudetechnik.  
Beweisen Sie, was in Ihnen steckt!

Alle Infos zu  
Job & Karriere auf  
vadea.ch

Wallisellen | St.Gallen | [vadea.ch](http://vadea.ch)

**VADEA**  
Engineering

**WOLF**

INNOVATIVE PLANUNG - PRÄZISE AUSFÜHRUNG - WIR VERBINDEN - FÜR ZUFRIEDENE KUNDEN

[www.wolf-klimatechnik.ch](http://www.wolf-klimatechnik.ch)

**WURM SYSTEME**

**Wurm (Schweiz) AG**  
Industriestrasse 5 - CH-6034 Inwil  
Tel +41 (0)41 455 61 61  
[info@wurm.ch](mailto:info@wurm.ch) / [www.wurm.ch](http://www.wurm.ch)

**Wir automatisieren Kälteanlagen und Gebäude**