

Froid efficace

Les installations frigorifiques dans l'industrie

■ Principes essentiels relatifs aux compresseurs de froid efficaces

Les cinq principaux points d'optimisation d'un système

- Adapter la puissance frigorifique au niveau réellement nécessaire
- Définir la courbe journalière, hebdomadaire et annuelle du besoin en froid: optimiser le coefficient de performance
- Envisager une régulation de la production de froid en fonction de la charge à l'aide d'un convertisseur de fréquence
- Utiliser un moteur d'entraînement plus efficace (IE3 ou IE4) et le dimensionner en fonction de la charge réellement nécessaire
- Choisir un compresseur efficace approprié à l'application spécifique



Objectif et public cible

La fiche technique Topmotors n° 27 traite des installations frigorifiques industrielles et des compresseurs frigorifiques efficaces. Elle s'adresse aux spécialistes du domaine (utilisateurs, planificateurs, installateurs, conseillers en énergie etc.) et leur fournit des informations sur la production de froid efficace, c'est-à-dire la planification de nouvelles installations ainsi que le savoir-faire en matière d'optimisation d'installations existantes. Les installations frigorifiques correctement dimensionnées et réglées en fonction de l'utilisation remplissent, pour une consommation d'énergie électrique minimale, toutes les exigences d'une exploitation quotidienne, par ailleurs la plus économique possible. Cette fiche technique cible la production et l'utilisation efficaces de froid dans l'industrie. Les petites applications (appareils de réfrigération et de congélation ménagers), les installations de froid commercial (p.ex. commerce de détail) ainsi que les climatiseurs d'ambiance ne sont pas traités ici.

Consommation d'énergie des systèmes frigorifiques

Les installations frigorifiques sont responsables à elles seules de 22 % (8 TWh/a)¹ de la consommation d'énergie en Suisse. Elles font partie, à côté des pompes, des ventilateurs et des compresseurs (d'air comprimé), des plus gros consommateurs d'énergie électrique de l'industrie (illustration 1). Environ 40 % de l'énergie électrique dédiée au froid sont utilisés dans les ménages et l'artisanat (réfrigérateurs et congélateurs, climatiseurs

¹ OFEN: Besoin en électricité pour le refroidissement en Suisse, Zurich 2012

d'ambiance) et 40 % sont consommés dans le domaine des services (moyennes et grandes installations frigorifiques pour la climatisation d'ambiance et les processus, p.ex. dans les centres de calcul). Les 20 % restants sont utilisés dans l'industrie pour le froid industriel, p.ex. dans le domaine agroalimentaire.

Rôles de l'exploitant et du fabricant

Le dimensionnement optimal d'une installation frigorifique nécessite une bonne coopération entre plusieurs disciplines spécialisées. Tout d'abord, il convient d'estimer le plus précisément possible le niveau de température effectivement requis pour le froid industriel, la puissance frigorifique nécessaire (débit volumique · capacité thermique spécifique · différence de température) ainsi que la courbe journalière, hebdomadaire et annuelle requise. L'installation doit être précisément dimensionnée pour tous les états d'utilisation, températures extérieures et exigences de production éventuels, et doit faire l'objet d'une simulation préalable. Il est important que les températures limites admissibles pour le produit à refroidir soient toujours parfaitement respectées et ne soient pas dépassées, indépendamment de la température extérieure et de la quantité de production. Sinon, il est probable de se retrouver avec des matières avariées et des conséquences financières importantes. Par la suite, un bureau d'étude ou un fabricant peut élaborer un concept qui respecte ces prescriptions le plus précisément possible et de la manière la plus économique possible. En principe, il convient d'éviter les surdimensionnements et durées d'exploitation inutiles afin de garantir un point de fonctionnement optimal. Après la

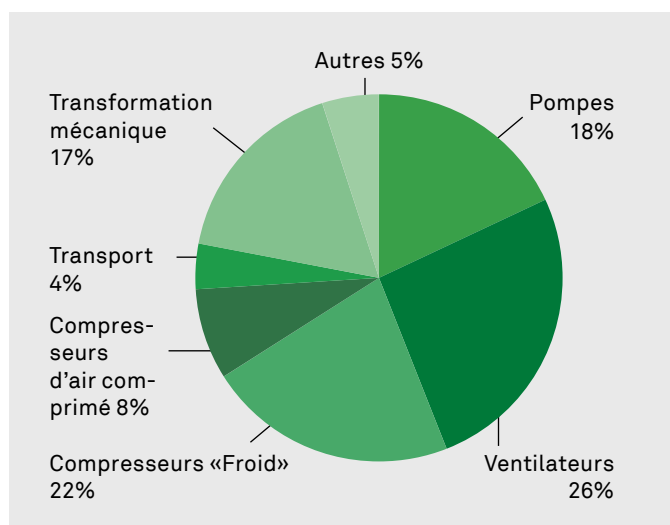


Illustration 1: Parts des besoins en électricité des moteurs électriques selon leur utilisation. (Source: Easy, 2012)

mise en œuvre, il est impératif de disposer de spécialistes internes aptes à comprendre et piloter l'installation, et étant en mesure de régler en continu l'exploitation lorsque le besoin varie. L'activation du mode week-end lors d'une journée sans production permet d'économiser une quantité d'énergie non négligeable, et ce sans grande difficulté.

Bases

Définition

Les installations frigorifiques techniques sont destinées à refroidir des objets et matériaux en dessous de la température ambiante, en prélevant de la chaleur au produit à refroidir et en la restituant à un autre endroit, dans l'environnement. La température ambiante est la température environnante de l'objet à refroidir. Il peut s'agir de la température du local dans les halles de production et de stockage, ou de la température extérieure. La dépense énergétique nécessaire à ce refroidissement dépend de la quantité de chaleur transportée (puissance frigorifique), de la différence de température et de l'efficacité énergétique de l'installation frigorifique. Le rendement théorique maximal possible d'une installation frigorifique est calculé à partir du cycle de Carnot inverse avec les températures absolues (unité en kelvin, 0 °C = 273,15 K).

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{Refroidissement}}}{T_{\text{ambiante}} - T_{\text{Refroidissement}}} = \text{EER (Energy Efficiency Ratio)}$$

Le coefficient d'efficacité ε pour les installations frigorifiques mécaniques, également connu sous la désignation anglaise Energy Efficiency Ratio (EER), est le rapport entre la puissance frigorifique produite et la puissance électrique consommée. Il est ainsi similaire au Coefficient of Performance (COP) pour les pompes à chaleur mécaniques, qui reflète le rapport entre la puissance thermique produite et la puissance électrique consommée.

Définition: la température de refroidissement est la température souhaitée de l'espace à refroidir ou de l'objet à refroidir. La température de refroidissement est supérieure à la température de l'évaporateur de l'installation frigorifique, car une différence de tempé-

rature (Delta T) est requise pour le transfert de chaleur. Plus cette différence de température est faible dans l'échangeur de chaleur, plus l'installation est efficace.

Exemple

Pour une température de refroidissement ($T_{\text{Refroidissement}}$) à 7 °C (280 K) en présence d'une température ambiante (T_{ambiante}) de 35 °C (308 K), on obtient un coefficient d'efficacité frigorifique théorique (ϵ) de 10.

$$\epsilon = \text{EER} = \frac{273\text{K} + 7\text{K}}{(273\text{K} + 35\text{K}) - (273\text{K} + 7\text{K})} = \frac{280\text{K}}{28\text{K}} = 10$$

Un coefficient d'efficacité frigorifique théorique de 10 signifie que 100 kW de puissance électrique permettent en théorie de produire 1000 kW de puissance frigorifique. Ainsi, de très bonnes installations frigorifiques atteignent un rendement d'environ 60 %, ce qui

correspond à un coefficient de performance frigorifique de 6. Ainsi, 100 kW de puissance électrique permettent effectivement de produire 600 kW de puissance frigorifique.

Où et comment utiliser les systèmes frigorifiques de manière pertinente?

Les domaines d'application des installations frigorifiques sont très divers. Les applications les plus fréquentes sont la conservation des produits alimentaires et la climatisation d'ambiance. Le refroidissement industriel désigne les multiples applications de froid dans l'industrie chimique, pharmaceutique, plastique, agroalimentaire et mécanique ainsi que dans la pétrochimie et autres secteurs (p. ex. dans les centres de calcul). Les installations frigorifiques sont toutefois également utilisées dans l'industrie minière, pour

Principe	Procédé	Remarques
Refroidissement	Air ambiant. La chaleur est transmise à l'air ambiant via un aéroréfrigérant. Cet effet peut être encore renforcé par une aspersion de l'aéroréfrigérant avec de l'eau.	En été, température de refroidissement élevée de plus de 30 °C possible. Dans la saison froide, toutefois, une alternative à l'installation de refroidissement (Free Cooling)
	Nappe phréatique. Selon la situation géographique, de l'eau de surface (eau de rivières ou de lacs) peut également être utilisée pour l'évacuation de la chaleur.	Selon le site, il peut être impossible ou interdit d'avoir une température de refroidissement inférieure à 10 °C en présence d'un refroidissement avec la nappe phréatique. Avec un refroidissement avec des eaux de surface, la température de refroidissement peut être supérieure.
	Géothermie. Apport de chaleur dans le sol.	Forage coûteux (30 W et 70 Fr. par m), température de refroidissement environ 10 °C
	Réseau de refroidissement. Raccordement à l'approvisionnement local en froid, similaire à l'approvisionnement en chauffage à distance.	Selon le site et la source, température de refroidissement souvent de 7 °C
Evaporation	Evaporation libre de liquide (refroidissement adiabatique)	L'humidité de l'air augmente dans la pièce.
	Compresseur frigorifique. La pression d'aspiration requise pour l'évaporation du fluide frigorigène est générée à l'aide d'un compresseur.	Méthode traditionnelle pour la production de froid, température de refroidissement au choix. Parfois fluides frigorigènes problématiques (toxiques pour la santé, pour l'environnement, etc.)
	Technologie de sorption. La pression d'aspiration requise pour l'évaporation du fluide frigorigène est générée à l'aide d'un solvant qui doit ensuite être régénéré à une température plus élevée.	Alternative répandue au compresseur frigorifique, intéressante en présence d'une grande quantité de chaleur rejetée de plus de 80 °C.
Expansion	Procédé Linde. Liquéfaction du gaz avec effet Joule-Thomson	Grandes installations, températures très basses
	Refroidissement à air comprimé. Tube vortex avec buse d'expansion pour l'air comprimé, un côté froid, l'autre chaud	Puissance < 2 kW, jusqu'à environ 40 K de différence de température, coefficient de performance frigorifique environ 0,1
	Moteur Stirling. Lorsque l'on entraîne un moteur Stirling, le premier côté devient chaud, l'autre froid.	Puissances < 10 kW, aucun fluide frigorigène nécessaire
Effets spéciaux	Elément Peltier. Élément semi-conducteur qui, lors du passage d'un courant, devient chaud d'un côté et froid de l'autre.	Faible puissance < 100 W, jusqu'à environ 15 K de différence de température
	Effet magnétocalorique de Gadolinium et Mangan	Encore en développement

Tableau 1: Différentes méthodes de refroidissement. (Source: energie.ch, 2017)

le refroidissement du béton, pour les patinoires artificielles, en médecine et dans la recherche. Souvent, les installations frigorifiques ne sont pas utilisées de manière optimale. Lorsqu'une installation de production est par exemple raccordée à un réseau de froid disponible (uniquement pour des raisons pratiques), l'installation est certes refroidie de manière fiable, mais un refroidissement avec la température ambiante serait néanmoins souvent suffisant. Cela s'applique par exemple aux extrudeuses, aux moteurs refroidis à l'eau, aux compresseurs d'air comprimé et à de nombreuses autres applications.

Systèmes alternatifs: absorption, Free Cooling, évaporation

Bien que les installations frigorifiques dotées de compresseurs frigorifiques à entraînement électrique soient les plus fréquentes, il existe également, selon la situation (tableau 1), des systèmes de refroidissement alternatifs intéressants.

Le circuit frigorifique à compression

L'illustration 2 présente le principe de fonctionnement d'une machine frigorifique et illustre les quatre principaux éléments du circuit frigorifique à compression:

1. Évaporateur: dans celui-ci, le fluide frigorigène liquide s'évapore à basse pression et à basse température. Ceci permet d'absorber de la chaleur dans l'environnement, ce qui produit du «froid» pouvant être utilisé pour le processus de refroidissement.

2. Compresseur: dans le compresseur, le frigorigène gazeux est comprimé à une pression élevée et se réchauffe.

3. Condenseur: dans le condenseur, le fluide frigorigène gazeux se refroidit tout d'abord à nouveau à partir d'une température relativement élevée (désurchauffeur), avant d'être à nouveau entièrement liquéfié (condensation) à un niveau de température constant.

4. Organe d'expansion (détendeur-flotteur): dans l'organe d'expansion, le fluide frigorigène liquide sous pression issu du condenseur est acheminé dans l'évaporateur où il s'évapore à nouveau en raison de la variation de pression.

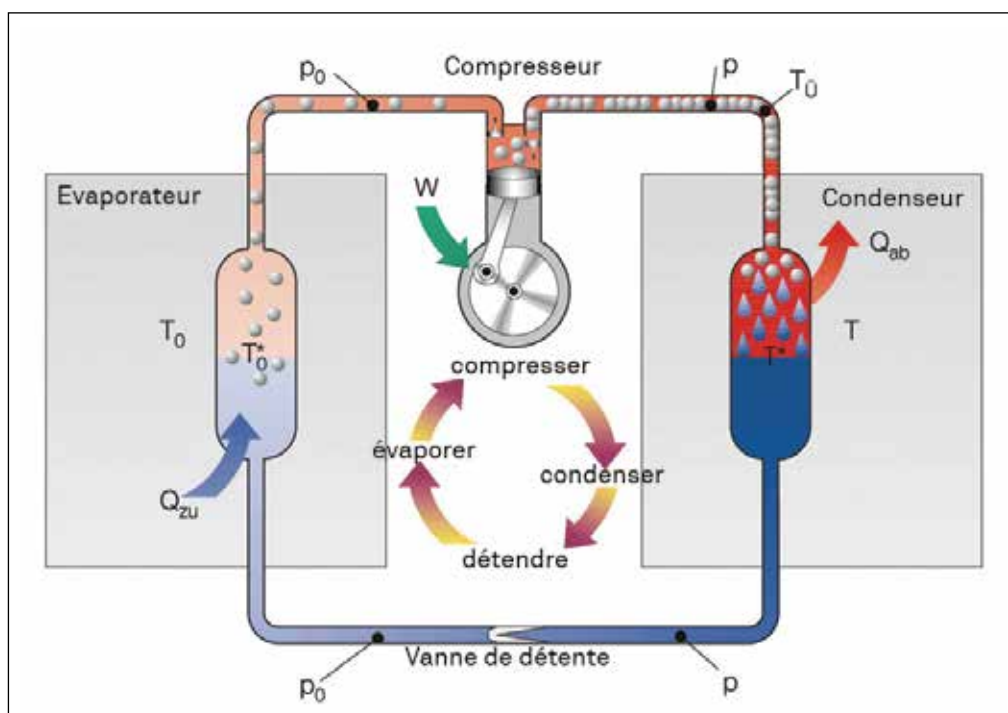


Illustration 2: Le circuit de froid de compression. (Source: MHG Heiztechnik GmbH, 2017)

Liste de contrôle pour des installations frigorifiques efficaces

Efficacité énergétique: l'optimisation énergétique d'une installation frigorifique commence avec l'utilisation du froid.

Domaine	Mesures
Poste froid	Surface minimale, division de l'espace en zones
	Isolation thermique optimale, suppression des ponts thermiques
	Pertes par la ventilation minimales, faible pénétration d'humidité, évacuation du condensat à l'aide d'un siphon
	Rayonnement thermique minimal, stores
	Réduction des sources de chaleur internes (éclairage, moteurs etc. réglés de manière efficace)
Refroidissement de masses	Vérifier les bases de calcul (masse par heure, fois la capacité thermique spécifique, fois la différence de température)
	Réduction du refroidissement supplémentaire: matériau d'emballage et de transport, eau, air etc.
	Débit massique constant? Possibilités d'accumulation?
	Refroidissement préalable avec la chaleur ambiante possible ou intéressant?
	Le besoin en chaleur des masses peut-il être utilisé après le refroidissement?
Température de refroidissement	Quelle température et quelle puissance de refroidissement sont nécessaires, et quand? Plus la température de refroidissement est élevée, plus la puissance du compresseur est faible
Transfert de froid	Refroidissement à l'air avec écoulement optimisé, ventilateurs réglés de manière efficace
	Refroidissement par eau avec pertes de pression minimales, pompes réglées de manière efficace
	Refroidissement par glace avec récupération de la glace et de l'eau de fonte
	Contact direct et rayonnement avec optimisation des surfaces
	Echangeur de chaleur avec faible déperdition de température (grande surface, bon transfert de chaleur, isolation par rapport à la pièce)
Distribution de froid: pertes de froid du réseau de froid = déperditions d'énergie	Vannes à fermeture étanche à 100 % pour isoler les différentes applications
	Faibles pertes de pression dans les échangeurs de chaleur (< 0,2 bar) et les conduites frigorifiques (vitesse inférieure à 2 m/s)
	Accumulateur de froid pour la réduction des cycles d'enclenchement du compresseur, fonctionnement lors des nuits fraîches
	Pompes à régulation efficace, aucune vanne d'étranglement ni dérivation
Compresseur frigorifique	Choix du système: plusieurs réseaux de froid selon le niveau de température requis (par exemple un avec la chaleur environnementale), plusieurs compresseurs, compresseurs à régime variable
	En cas de temps froid: Free Cooling
	Compresseur efficace
	Moteurs efficaces (IE3 ou plus) selon le temps de fonctionnement
Aéroréfrigérant	Utilisation directe de la chaleur rejetée: préchauffage de l'eau chaude, piscine, connexion avec le voisinage. Utilisation de la chaleur rejetée à un niveau de température relativement élevé avec pompe à chaleur, éventuellement pour le chauffage.
	Nappe phréatique, eau lacustre, géothermie, accumulateur de chaleur
	Refroidissement à l'air, ventilateurs efficaces réglés
	Echangeur de chaleur avec faible déperdition de température
Surveillance	Enregistrement du besoin en froid des applications (débit massique, température intérieure et extérieure) et du besoin de puissance électrique de l'installation frigorifique, et sur cette base, contrôle continu du rendement. Si un poste froid n'a pas besoin de froid, celui-ci ne doit pas être refroidi.
	Contrôle régulier des exigences de température et du système
	Installation d'un compteur d'électricité propre à l'installation frigorifique

Tableau 2: Optimisation énergétique d'une installation frigorifique

Flux d'énergie d'une installation frigorifique

L'illustration 3 montre et compare le flux d'énergie de deux installations frigorifiques. Les deux installations fournissent 50 kW de puissance utile, mais ont des besoins différents en matière d'énergie électrique. L'installation rouge montre le flux d'énergie d'une installation sous-optimale avec un dimensionnement inapproprié et des composants ayant des rendements moyens. L'installation verte illustre à l'inverse le flux d'énergie d'une installation correctement dimensionnée avec des composants efficaces. La consommation électrique de l'installation rouge, de 100 kW, est le double de celle de l'installation verte, de 50 kW.

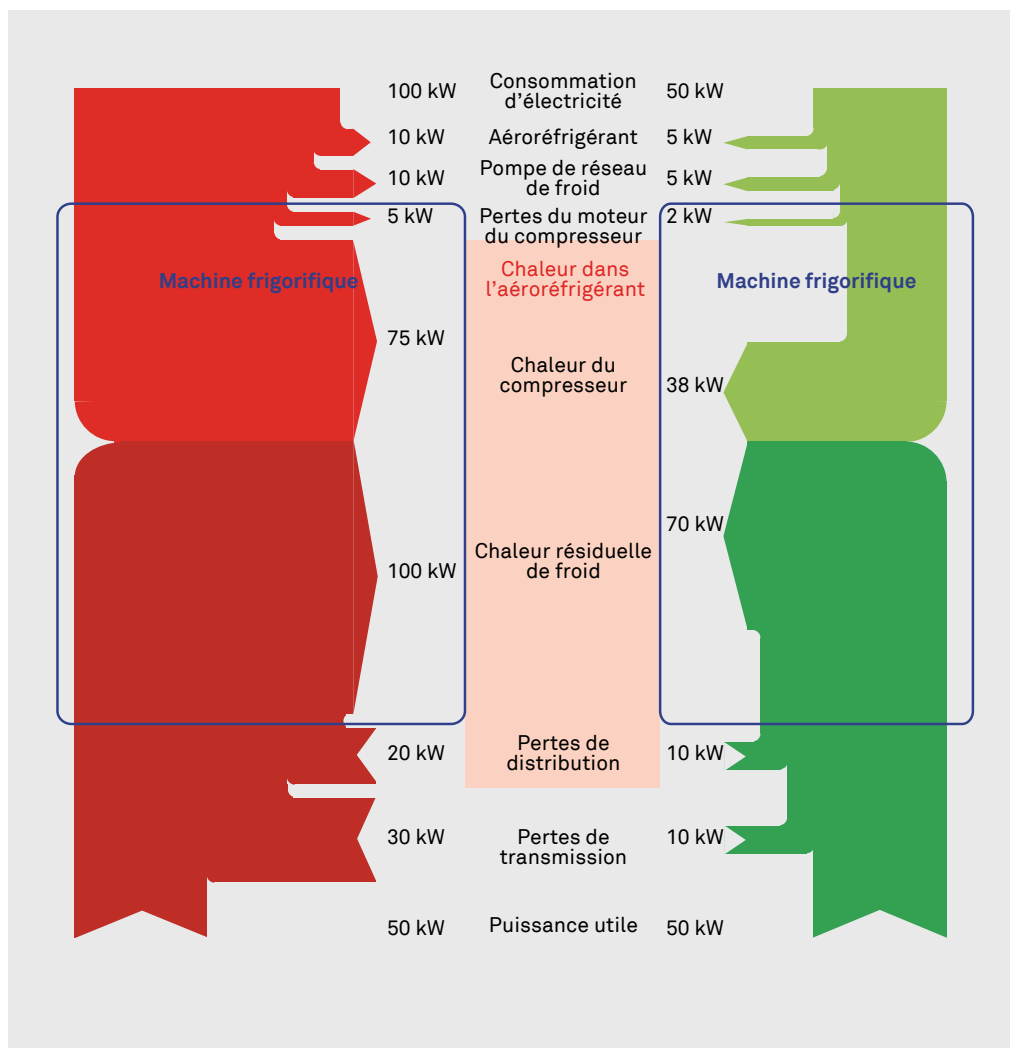


Illustration 3: Flux d'énergie d'une installation frigorifique sous-optimale (rouge, à gauche) et optimale (vert, à droite). (Source: energie.ch, 2017)

Systèmes de compression efficaces

Comme dans le cas de nombreuses autres machines rotatives (pompes, ventilateurs, moteurs etc.), il existe également dans le cas des machines frigorifiques des différences considérables, spécifiques aux fabricants, en termes d'efficacité énergétique, de l'ordre de $\pm 20\%$. L'illustration 4 montre l'étude d'Eurovent sur 1295 installations frigorifiques. Elle illustre la répartition du coefficient d'efficacité énergétique selon la puissance frigorifique. Elle montre clairement que différents fabricants affichent, pour une même puissance frigorifique, des différences d'efficacité de $\pm 20\%$. C'est pourquoi il est indispensable de disposer de critères comparables lors de l'appel d'offre d'une installation pour pouvoir comparer des installations, des rendements et des prix. De mauvais rendements ont un effet négatif pendant toute la durée de vie de l'installation et sont difficiles et coûteux à corriger après la mise en service.

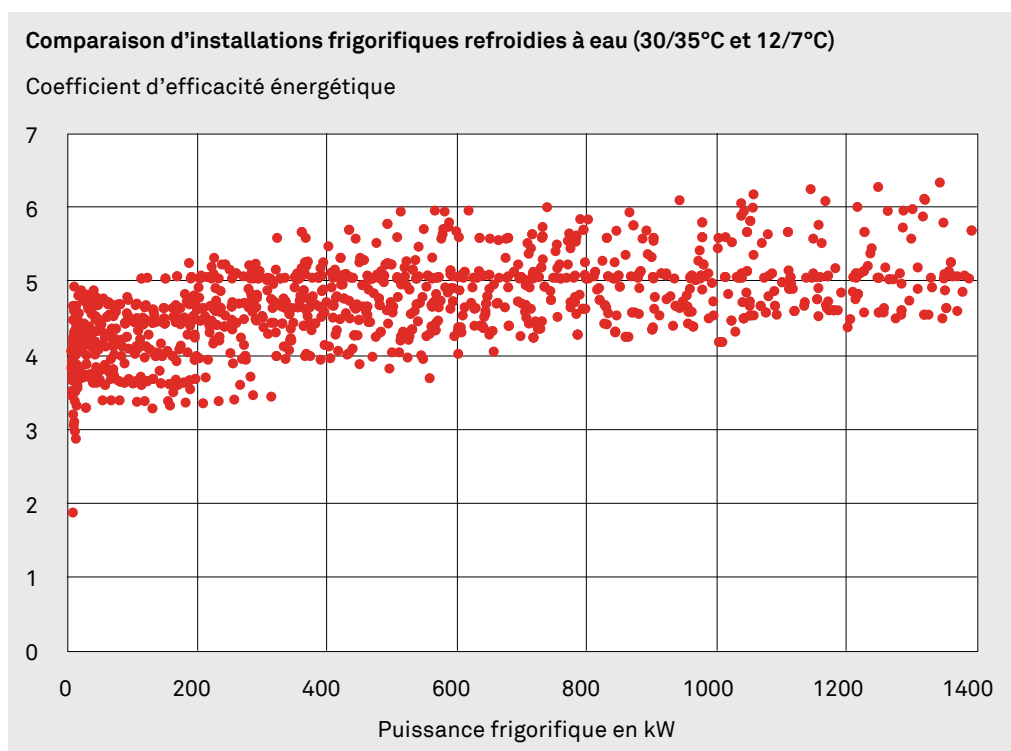


Illustration 4: Comparaison de 1295 productions d'eau glacée. Le coefficient théorique maximal se situe à $(273\text{ K} + 7\text{ K}) / 28\text{ K} = 10$. (Source: Eurovent, présentation: energie.ch, 2017)

Différentes technologies de compresseurs

Matériel (machines standard, installations spécifiques au client)

- Compresseur à pistons
- Compresseur Scroll
- Compresseur à vis
- Turbocompresseur

Les différents types de compresseurs sont plus ou moins adaptés à une utilisation donnée, selon la puissance frigorifique/le volume balayé requis et le rapport de pression. Leur utilisation dépend de la puissance frigorifique, des conditions d'exploitation, des limites d'utilisation, de l'efficacité énergétique, du fluide frigorigène, de la sécurité d'exploitation etc.

Compresseur à pistons

- Puissances faibles à moyennes
- Utilisation universelle
- Haute efficacité
- Grande fiabilité
- Maintenance simple

Compresseur Scroll

- Puissances faibles à moyennes
- Principalement refroidissement normal et applications de froid de climatisation
- Applications de congélation, très coûteux
- Maintenance possible uniquement dans un atelier spécialisé.

Compresseur à vis

- Grandes installations commerciales et froid industriel
- Vaste champ d'application
- Flexible en termes de fluides frigorigènes
- Haute efficacité
- Grande fiabilité
- Maintenance uniquement dans un atelier spécialisé.

Turbocompresseur

- Grande fiabilité
- Puissances grandes à très grandes
- Domaine d'utilisation limité
- Grande fiabilité
- Maintenance relativement simple par des spécialistes.

Différents types de construction sont possibles.

■ **Type de construction hermétique:** le compresseur et le moteur sont soudés dans un carter métallique (petits compresseurs, p.ex. réfrigérateur)

■ **Type de construction semi-hermétique:** le compresseur et le moteur se trouvent dans un carter qui peut être démonté à des fins de maintenance (installations frigorifiques compactes moyennes).

■ **Type de construction ouvert:** le compresseur et le moteur sont séparés l'un de l'autre par arbre de transmission et joint d'étanchéité (grandes installations frigorifiques).

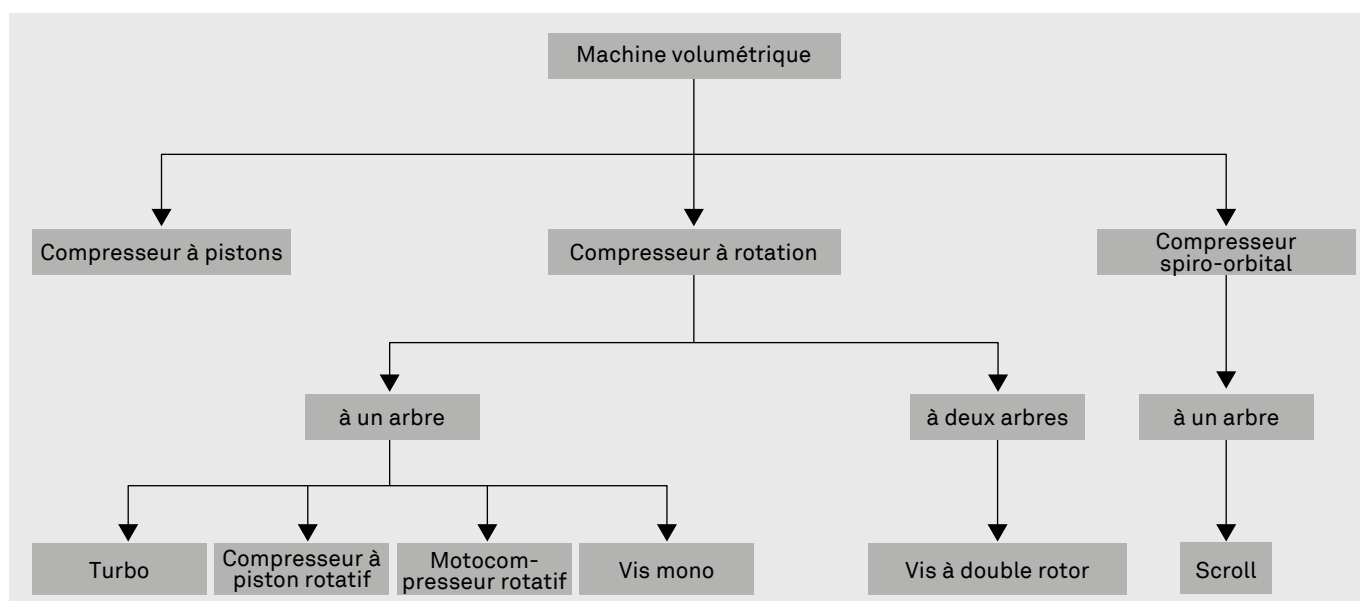


Illustration 5: Aperçu des technologies de compresseur. (Source: Karl Breitenbach, 2017)

Fluide frigorigène

La destruction de la couche d'ozone dans la stratosphère ainsi que l'effet de serre atmosphérique dus aux émissions des fluides frigorigènes ont engendré, depuis le début des années 90, des modifications importantes dans le domaine du froid et de la climatisation. L'un des grands objectifs de ce siècle est la réduction drastique des émissions directes dues aux pertes de fluides frigorigènes ainsi que des émissions indirectes, grâce à des installations particulièrement efficaces.

Bien que les émissions indirectes dues à la production d'énergie soient supérieures aux émissions directes (équivalents CO₂) dues aux fluides frigorigènes HFC (hydrofluorocarbures partiellement halogénés), il faudra composer à l'avenir avec des restrictions d'utilisation ou des interdictions de fluides frigorigènes ayant un fort potentiel d'effet de serre (PRG, Potentiel de réchauffement global) (tableau 3). Pour atteindre cet objectif, une méthode de calcul a été développée, permettant d'estimer les conséquences globales sur l'effet de serre (TEWI = Total Equivalent Warming Impact – total impact total sur l'effet de serre).

Le PRG prend en compte un horizon de 100 ans. Cela signifie p. ex. que l'émission d'1 kg du fluide frigorigène R134a équivaut à l'émission de 1430 kg CO₂ (PRG100 = 1430).

Le principal impact sur l'effet de serre d'une installation frigorifique provient de l'émission indirecte de CO₂ par la production d'énergie. En raison de la propor-

tion élevée de combustible fossiles dans les centrales nucléaires, la masse de CO₂ libérée s'élève, en moyenne européenne, à environ 0,45 kg par kWh d'énergie électrique ($\beta = 0,45 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$).

Pour réduire au minimum le TEWI, les quantités de remplissage en fluide frigorigène doivent être réduites et surtout, des compresseurs hautement efficaces et ayant un faible besoin en énergie doivent être utilisés. L'influence de la consommation d'énergie pour les productions de froid est plus déterminante pour le TEWI que la quantité de remplissage en fluide frigorigène.

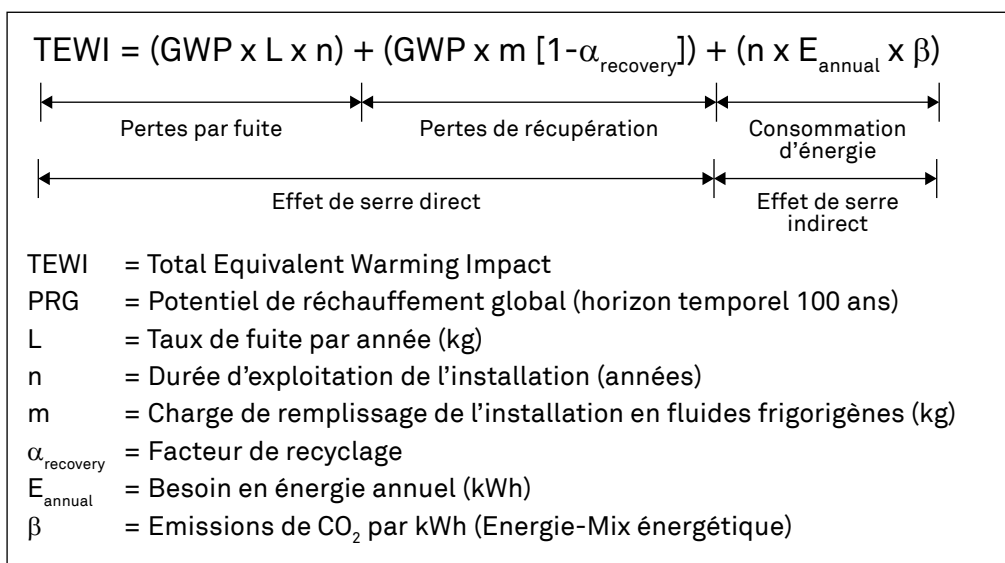


Illustration 6: Méthode de calcul pour facteurs TEWI, SN EN 378. (Source: Bitzer, 2017)

Aperçu des principaux fluides frigorigènes

Statut légal conformément à l'annexe 2.10 de l'ORRChim	Catégorie		Fluide frigorigène (exemples)	PRG ¹	Groupe de sécurité ²	Remarques
Fluides frigorigènes interdits	HFC (chlorés, perhalogénés)		R11 R12 R502 (mélange) R13B1		A1 A1 A1 A1	Interdiction pour les nouvelles installations, la revente, les extensions et les transformations. Les installations existantes peuvent continuer à fonctionner, mais ne doivent pas être à nouveau remplies. Pour les installations existantes avec plus de 3 kg de frigorigène: obligation de signalement (www.smkw.ch), cahier de maintenance et contrôle d'étanchéité nécessaires.
		HCFC (chlorés, partiellement halogénés)	Fluide frigorigène mono-composant	R22	A1	
	Mélanges (Blends), majoritairement contenant du R22		R401A (MP39) R402A (HP80) R402B (HP81) R408A (FX-10) R409A (FX-56)	A1 A1 A1 A1		
Fluide frigorigène pour des applications limitées dans des installations et appareils neufs	FKW / HFKW (sans chlore)	Fluide frigorigène mono-composant	R23	14800	A1	Les nouvelles réalisations, extensions et transformations d'installations avec des fluides frigorigènes stables dans l'air sont interdites à partir du 1.12.2013 au-dessus de certaines puissances frigorifiques. Condition pour une autorisation exceptionnelle: si d'après l'état de la technique, les exigences de sécurité conformément à SN EN 378-1, -2 et -3 ne peuvent être respectées sans fluides frigorigènes stables dans l'air. Pour les installations avec plus de 3 kg de fluide frigorigène: obligation de signalement (www.smkw.ch), cahier de maintenance et contrôle d'étanchéité nécessaires.
			R32	675	(A2) ⁴	
			R134a	1430	A1	
			R125	3500	A1	
			R143a	4470	A2	
		Mélanges (Blends)	R404A	3920	A1	
			R407C	1770	A1	
			R407F	1825	A1	
			R410A	2090	A1	
			R413A	2050	(A2) ⁴	
R417A	2350	A1				
R422A	3140	A1				
R422D	2730	A1				
R437A	1685	A1				
R507A	3980	A1				
Mélanges avec HFO (Blends)	R448A	1386	A1			
	R449A	1397	A1			
	R450A	601	A1			
	R513A	631	A1			
Fluides frigorigènes autorisés sous réserve du respect des exigences de sécurité	naturels	Fluide frigorigène mono-composant	R170 (éthane)	3	A3	Les fluides frigorigènes naturels doivent être privilégiés pour les nouvelles installations, les extensions et les transformations. Pour les installations avec plus de 3 kg de fluide frigorigène: cahier de maintenance nécessaire.
			R290 (propane)	3	A3	
			R717 (NH ₃)	0	(B2) ⁴	
			R718 (H ₂ O)	< 1	A1	
			R744 (CO ₂)	1	A1	
			R600a (isobutane)	3	A3	
			R1270 (propène)	3	A3	
	Mélanges (Blends)	R290/R600a	3	A3		
		R290/R170	3	A3		
		R723 (DME/NH3) ³	8			
HFO (fluoroléfinés partiellement halogénés)		HFO-1234yf	4	(A2) 4	Fluides frigorigènes autorisés. Pour les installations avec plus de 3 kg de fluide frigorigène: cahier de maintenance nécessaire.	
		HFO-1234ze	6	(A2) 4		

¹ Potentiel de réchauffement global (PRG) sur un horizon de 100 ans, valeurs issues de l'IPCC IV (2007). www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm; valeurs PRG pour les mélanges: conformément aux parts massiques respectives des

² Groupe de sécurité conformément à SN EN 378-1:2017+A2:2017

³ R723 n'est pas enregistré dans la norme SN EN 378-1:2017+A2:2017 (voir fabricant Schick R723)

⁴ Groupe de sécurité selon SN EN 378-1:2017+A2:2017; non encore définitivement fixé

Tableau 3: Les principaux fluides frigorigènes. (Source: OFEV, 2017). La nouvelle norme SN EN 378-1:2017 est entrée en vigueur au 1^{er} mai 2017. De ce fait, le tableau définitif avec les principaux fluides frigorigènes n'a pas encore été publié.

Dimensionnement des nouvelles installations frigorifiques

Lieu d'installation, conditions, exigences en matière d'exploitation

- Déterminer le besoin, le niveau de froid et la caractéristique du système
- Garantir la flexibilité vis-à-vis des variations des besoins
- Veiller au dimensionnement suffisant du réseau de distribution, de l'accumulateur et de l'isolation thermique
- Dimensionner la régulation et la commande générale en fonction du besoin
- Choisir un compresseur adapté à l'application
- Moteur: les moteurs efficaces sont aujourd'hui classés dans les catégories d'efficacité IE1 à IE4 selon IED 60034-30-1 (2014). Dans le cas des installations affichant de nombreuses heures de service par an, il s'avère en général rapidement rentable d'opter pour des moteurs efficaces malgré les coûts supplémentaires. Vous trouverez d'autres informations sur les rendements dans la fiche technique Topmotors gratuite n° 13: Rendements.
- Convertisseur de fréquence: l'utilisation de convertisseurs de fréquence (CF) pour la régulation du régime permet de faire baisser la consommation d'énergie de l'installation. Cela nécessite néanmoins une analyse approfondie, car les CF engendrent leurs propres déperditions et peuvent détériorer le rendement des moteurs. Selon le type de compresseur, il existe parfois des possibilités limitées de réduction du régime. Vous trouverez plus d'informations sur les rendements dans la fiche technique Topmotors gratuite n° 23: Convertisseurs de fréquence.
- Prendre en compte la récupération de chaleur et l'utilisation de la chaleur rejetée dans le concept global
- Définir des prescriptions claires en matière d'efficacité dans l'appel d'offres
- Déterminer les critères de réception, y compris les mesures d'efficacité à réaliser
- Éviter le mode dégivrage
- Définir les exigences de température vis-à-vis du produit à refroidir
- Sas pour les congélateurs
- Etroite collaboration impérative entre le planificateur et le fournisseur

Les indications suivantes se basent sur les normes très connues SIA et SN EN 378:2017 et les recommandations de l'OFEN. Elles s'adressent en premier lieu aux exploitants industriels. Leur mise en application est parfois relativement complexe, mais peut être réalisée sans problème d'après l'état actuel de la technique. Les coûts d'investissement pour des mesures et composants visant à accroître l'efficacité sont en général supérieurs aux coûts investis pour respecter à minima les prescriptions légales minimales. Ces coûts supplémentaires sont facilement amortis au sein d'une période d'exploitation raisonnable en présence de nombreuses heures d'exploitation annuelles, grâce à des coûts plus bas de l'énergie. Les fabricants sont aujourd'hui davantage tenus de construire des installations correctes sur le plan énergétique, et ont l'obligation de se soumettre à des contrôles attestant de l'exactitude des données parfois idéalistes qu'ils fournissent.

Garantie de performance et de système

Les valeurs de puissance indiquées par les fabricants s'entendent comme une définition obligatoire de l'installation frigorifique. Si ces valeurs divergent négativement dans la pratique, le fournisseur ou le fabricant est tenu d'améliorer l'installation à ses frais ou de prendre en charge les frais d'une adaptation par des tiers. La valeur COP/EER doit être indiquée sous forme de valeur minimale absolue. Les tolérances du fabricant ou de la fabrication ainsi que les tolérances de mesure sont ainsi déjà déduites. Pour la détermination de la valeur COP/EER, on utilise les valeurs de mesure des compteurs d'énergie fixes.

Exploitation optimale de l'installation

Le fournisseur est tenu d'autoriser toutes les dépenses nécessaires pour atteindre l'exploitation optimale demandée. L'exploitation de l'installation est enregistrée. En cas d'écarts par rapport à l'exploitation optimale, les améliorations ultérieures incombent au fournisseur. Cela peut se traduire par plusieurs réglages successifs ou par un nouveau réglage de l'installation en collaboration avec la société de réglage, le fournisseur du tableau et l'électricien.

Mesure d'efficience

Les données sont déterminées pour une pleine charge durable. Les mesures de garantie débutent 15 minutes après le démarrage de l'installation frigorifique ou de la pompe à chaleur et durent au moins une heure. La justification des données de garantie s'effectue autant que possible avec les instruments d'exploitation installés, ceux-ci devant présenter une précision connue. A cet effet, des points de l'installation fixes doivent être prévus dès la planification. L'exactitude des résultats des essais est à calculer sur la base de la VDI 2048.

Si l'on ne peut démontrer de façon plausible que les performances ou données garanties sont atteintes avec les appareils de mesure disponibles ou utilisés en supplément par le mandataire, et en tenant compte des précisions de mesure, un institut indépendant doit être mandaté pour la justification. Le fournisseur prend en charge les frais de la justification, les coûts de la seconde mesure après amélioration ultérieure de l'installation et les coûts supplémentaires résultant de l'exploitation de l'installation jusqu'à la suppression des défauts en cas de non respect des données de garantie.

Essai de fonctionnement et accompagnement pendant 4 semaines

Après la mise en service, l'installation dans son ensemble doit être suivie par un spécialiste de l'exploitant pour garantir une exploitation sans problème 24h/24. La nuit et le week-end, le spécialiste est d'astreinte et doit pouvoir se rendre sur l'installation en une heure. A la fin de la période d'essai, un contrôle ultérieur doit être réalisé, consigné et le personnel d'exploitation doit recevoir les formations adéquates.

Optimisation des systèmes frigorifiques existants

Généralités

Une installation frigorifique fonctionne de manière optimale et efficiente lorsqu'elle a besoin de la plus faible puissance d'entraînement possible pour atteindre sa puissance frigorifique. Cela signifie que dans le cas d'une installation frigorifique, l'important n'est pas la puissance du moteur, mais la puissance frigorifique.

A) Type de compresseurs de fluide frigorigène

Il existe pour les différentes applications une multitude de types de construction différents de compresseurs (illustration 5). En fonction des exigences (pression, volume, puissance frigorifique, heures de service etc.),

les différents compresseurs sont plus ou moins appropriés. Ainsi, il convient de vérifier avec le fabricant si le type de compresseur en exploitation peut remplir de manière idéale les exigences actuelles et futures. Pour les installations relativement anciennes, qui doivent subir des révisions de grande ampleur, une analyse approfondie est pertinente.

B) Exigence en matière de moteurs électriques dans la technique frigorifique

Les moteurs électriques dont l'efficience ne peut pas être relevée indépendamment du produit doivent atteindre soit le niveau d'efficience IE3, soit le niveau IE2 s'ils sont équipés d'une régulation du régime (convertisseur de fréquence) (Ordonnance sur l'énergie OEne, Annexe 2.10, base de la directive Ecodesign no 640/2009). En cas d'utilisation de types de compresseurs ouverts, les moteurs d'entraînement doivent répondre aux exigences de l'OEne. Pour des compresseurs de fluide frigorigène identiques, différents moteurs de différentes puissances sont nécessaires, selon la fréquence de rotation et les conditions d'exploitation. Pour tous les types de compresseurs, la plage de régimes indiquée par le fabricant doit être respectée.

C) Utilisation des compresseurs de fluide frigorigène par rapport au débit volumique d'admission en m³/h

Compresseur à pistons	jusqu'à 1500 m ³ /h
Compresseur (Scroll)	jusqu'à 500 m ³ /h
Compresseur à vis	de 100 à 5000 m ³ /h
Turbocompresseur	de 100 à 50 000 m ³ /h

D) Influences sur l'efficience des compresseurs de fluide frigorigène

■ **Fluide frigorigène:** selon les données du fluide frigorigène (densité, masse moléculaire, capacité thermique spécifique), on obtient différents rendements qui ont une incidence sur les valeurs EER ou COP.

■ **Type de compresseurs:** pour un même fluide frigorigène et des conditions d'exploitation identiques, le COP (EER) peut varier de 10 à 20 % (matériaux, espace nuisible, construction) (illustration 4).

■ **Le rapport de pression entre la température de condensation et la température d'évaporation** est déterminant pour l'efficience d'un compresseur.

■ **En général:** plus la température de condensation est basse et plus la température d'évaporation est élevée, plus le compresseur est efficient.

■ **Sous-refroidissement du fluide frigorigène:** un liquide frigorigène est sous-refroidi lorsque sa tempé-

rature est inférieure à la température de condensation. Le sous-refroidissement peut être atteint aussi bien avec de l'eau d'un aéroréfrigérant air-eau, avec le fluide frigorigène d'un échangeur de chaleur, avec du fluide frigorigène etc.

Exemple: un sous-refroidissement du fluide frigorigène R134a de 3 K pour une température de condensation de 45 °C et une température d'évaporation de 3 °C accroît l' EER de 3,4 %, pour 5 K de 5,4 %.

■ **Dimensionnement des composants:** la plage d'application, la chute de pression et le positionnement de montage ont une influence directe sur l'efficacité énergétique.

E) Composants contribuant à l'efficacité

Compresseur ou turbocompresseur

- Convertisseur de fréquence (technologie inverter)
- Régulation du débit volumique
- Vanne magnétique (tête de cylindre)
- Economiser
- Réglage des vannes (turbo)

Ventilateurs de condenseur ou aéroréfrigérant en fonction de la pression ou de la température extérieure

- Convertisseur de fréquence
- Moteurs à commutation électronique (moteurs EC)
- Réglage de l'angle de phase (moins efficace que CF)

Différence de température d'échangeur de chaleur
Conformément aux prescriptions de la campagne Froid efficient (www.effizientekälte.ch).

F) Observations sur place

Quels paramètres et effets visibles indiquent une mauvaise efficacité du compresseur du moteur?

- Présence de plaque signalétique ou d'autocollants?
- Coloration brune des couvercles de cylindres sur le compresseur
- Détérioration de la couleur sur le compresseur
- Conduite d'admission givrée
- Coloration sombre de l'huile dans le regard
- Bulles dans le regard du fluide frigorigène
- Bref enclenchement/déclenchement du compresseur; en général, on observe max. 6 à 10 enclenchements/déclenchements par heure
- Bruits de roulement ou vibrations
- Différence de température entre la température d'évaporation et la sortie d'eau glacée ≥ 5 K
- Différence de température entre la température de condensation et la sortie du caloporteur ≥ 5 K

■ Une différence de température entre l'entrée d'air et la température de condensation ≤ 13 K est correcte.

Viser 8 K

- Les températures d'utilisation des consommateurs sont trop basses.
- Chauffage et refroidissement simultanés dans la même pièce
- Les espaces vides ou les processus à l'arrêt continuent à être refroidis.
- Consommation électrique du compresseur plus de 10 % supérieure à la consommation lors de la mise en service (température de condensation plus élevée).
- Consommation électrique du compresseur plus de 10 % inférieure à la consommation lors de la mise en service (température d'évaporation plus basse).
- L'utilisation de la chaleur rejetée fonctionne à un niveau de température trop élevé.
- Pressions de fluide frigorigène trop élevées (cause: encrassement des échangeurs de chaleur, fluide frigorigène inapproprié ou mélangé, air ou gaz étranger dans l'installation).

Ce qui ne doit pas se produire

■ Si le diamètre de l'accumulateur est choisi trop grand, la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'accumulateur est quasiment nulle. Cela conduit à des mauvaises circulations et à une régulation défectueuse.

KWS (Production de froid-Production d'eau glacée)

- Manque d'isolation des conduites d'aspiration
- Manque d'isolation de la conduite HP avec URT
- Manque d'isolation de l'accumulateur d'eau glacée et d'eau chaude, de ses conduites et distributeurs
- Évaporation préalable du fluide frigorigène dans la bouteille liquide, le condenseur à faisceaux tubulaires, le réseau de conduites. L'évaporation doit s'effectuer dans l'évaporateur, car une évaporation précoce du fluide frigorigène réduit l'efficacité de l'installation.
- Manque de maintenance, ses conséquences (voir l'article 58 du Droit des obligations OR)

Exemples pratiques

Exemple 1

Comparaison entre les coefficients d'efficacité énergétique (Energy Efficiency Ratio – EER) d'un compresseur avec les fluides frigorigènes NH₃, R407C, R134A et R410A à 30 °C et 45 °C de température de condensation. Le dimensionnement a été réalisé avec un logiciel de Copeland et Bitzer.

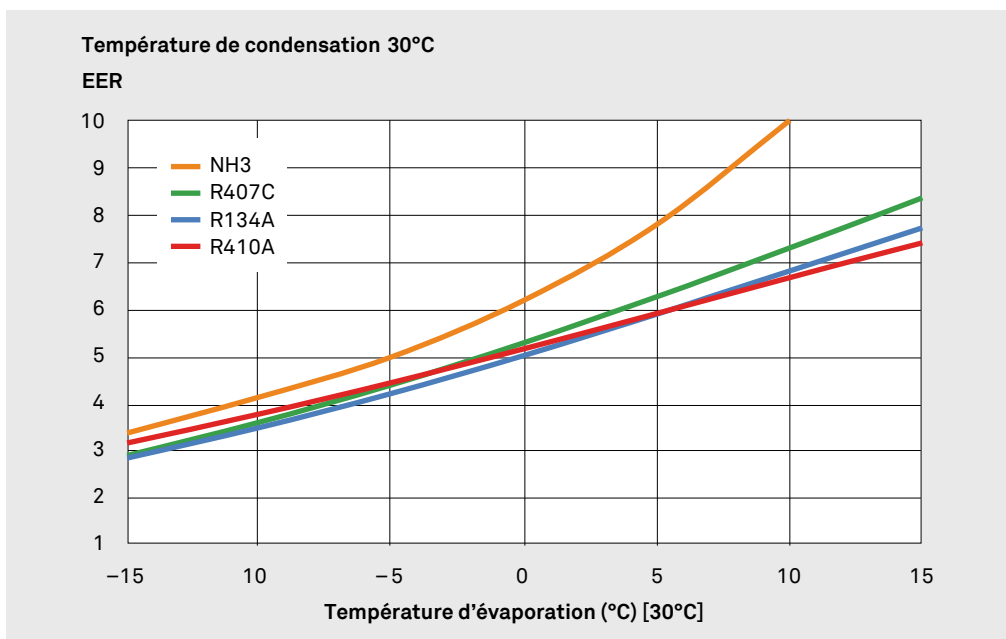


Illustration 7: Comparaison des rendements avec différents fluides frigorigènes, 30 °C. (Source: Clima Net AG, 2017)

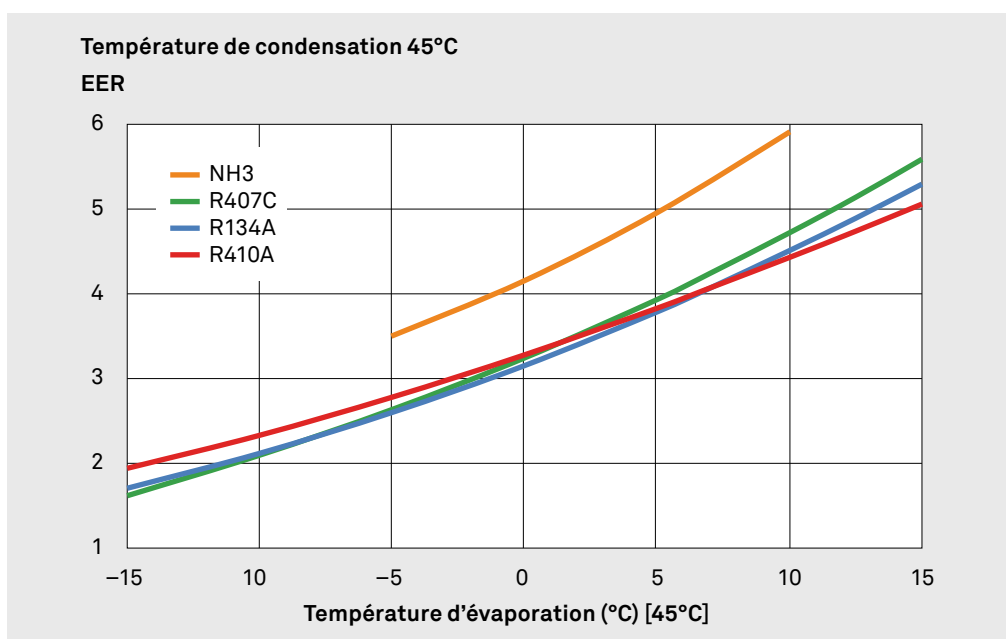


Illustration 8: Comparaison des rendements avec différents fluides frigorigènes, 45 °C. (Source: Clima Net AG, 2017)

Exemple 2

Avec diagramme log-p-h pour fluide frigorigène R410A

	Instal. I	Instal. II
Température de condensation t_c	48,0 °C	40 °C
Sous-refroidissement du fluide frigorigène t_u	1,0 °C	5,0 °C
Température d'évaporation t_e	1,0 °C	4,0 °C
Perte de charge évaporateur (côté fluide frigorigène)	1,00 bar	0,50 bar
Perte de charge du condenseur (côté fluide frigorigène)	1,00 bar	0,50 bar
Perte de charge dans la conduite d'aspiration	0,30 bar	0,02 bar
Perte de charge dans la conduite haute pression	0,50 bar	0,30 bar
Perte de charge dans la conduite de liquide	0,05 bar	0,02 bar
Efficiéce isentropique	0,9	0,9
EER	3,52	5,54

Rapport complémentaire au diagramme log-p-h

Quelles mesures auraient pu permettre d'adapter l'efficacité énergétique de l'installation I à l'installation II?

Température de condensation

■ Augmentation de la surface de condenseur par une différence de température plus faible entre l'entrée d'air dans le condenseur et la température de condensation.

■ Régulation de la température de condensation adaptée à la température extérieure (réglage de la valeur de consigne en fonction de la température extérieure).

■ Le sous-refroidissement assure un fluide frigorigène sans bulles en amont de l'organe d'expansion par:

- Une bouteille de fluide frigorigène verticale
- Un serpentin supplémentaire intégré sous le condenseur pour un sous-refroidissement complémentaire de 10K
- Un sous-refroidissement par échangeur thermique (fluide frigorigène liquide/gaz d'aspiration)
- Dans l'accumulateur d'eau sanitaire, sous-refroidissement à l'aide d'un échangeur placé dans la partie basse de l'accumulateur.

Température d'évaporation

■ Surface d'évaporateur relativement importante grâce à un Delta T plus petit entre la température d'évaporation et la température de sortie d'air de l'eau glacée

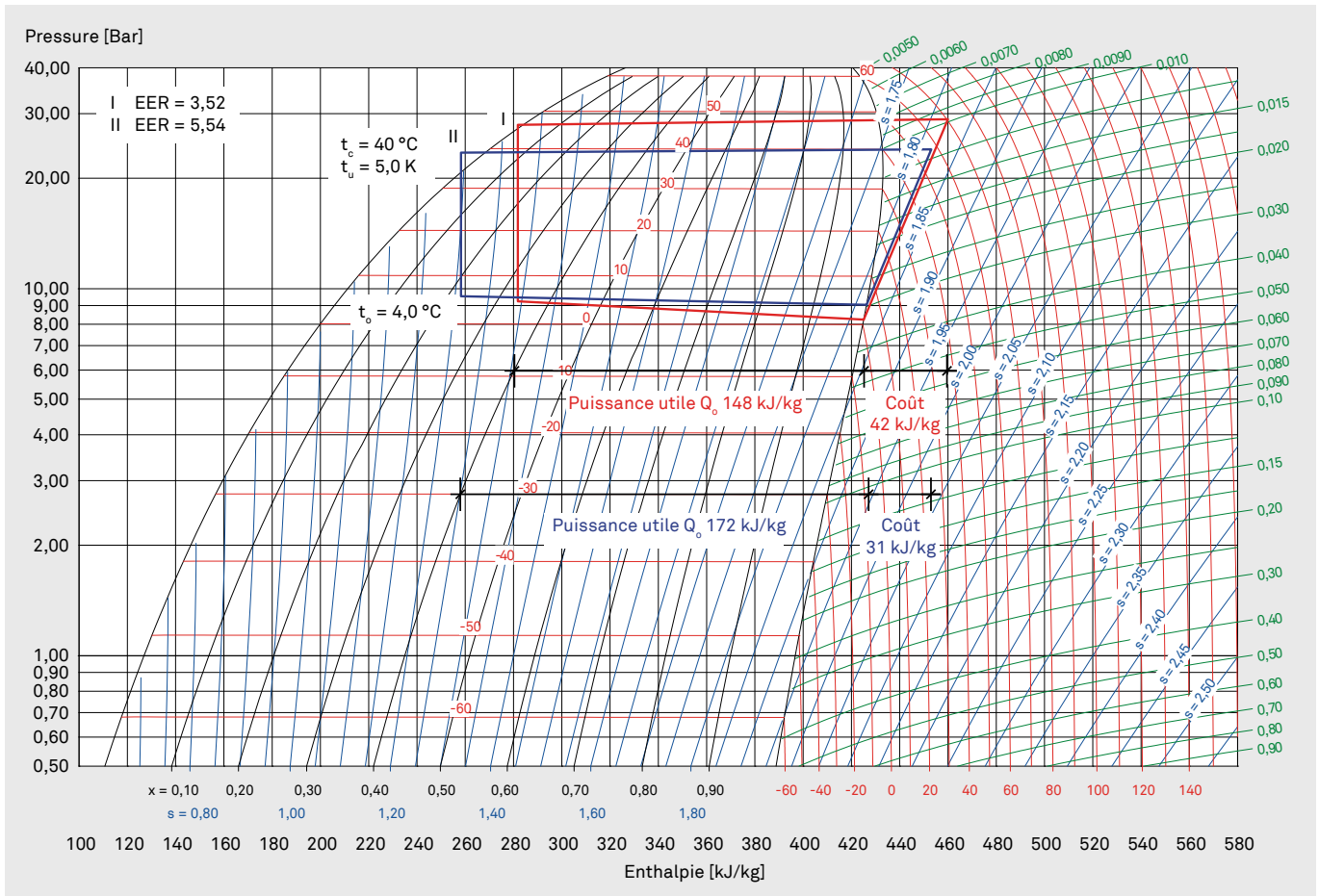


Illustration 9: Comparaison de deux installations frigorifiques avec le fluide frigorigène R410a. (Source: Robert Dumortier), 2017

■ Adaptation de la température utile

Chute de pression

■ Minimiser la chute de pression côté fluide frigorigène dans l'évaporateur et le condenseur. Selon la construction, la chute de pression peut par exemple être améliorée par une répartition idéale de l'injection, un débit massique optimal du fluide frigorigène et une faible turbulence d'écoulement.

Exemple 3: salle des serveurs (Free Cooling)

Dans les locaux de serveurs (illustration 10), l'air entrant est acheminé en bas à travers un faux-plancher jusque dans l'armoire. L'air chaud rejeté est aspiré en haut au niveau du plafond. Ce principe de base est bon. Le problème se pose lorsque l'air est trop froid (une température de 24 °C serait idéale), que la quantité d'air recyclé n'est pas réglée à une différence de température de par exemple 10 K et que le refroidissement ne s'effectue pas via l'air extérieur. Ce n'est qu'en présence d'une température extérieure supérieure à 22 °C qu'une machine frigorifique peut être intégrée dans le circuit.

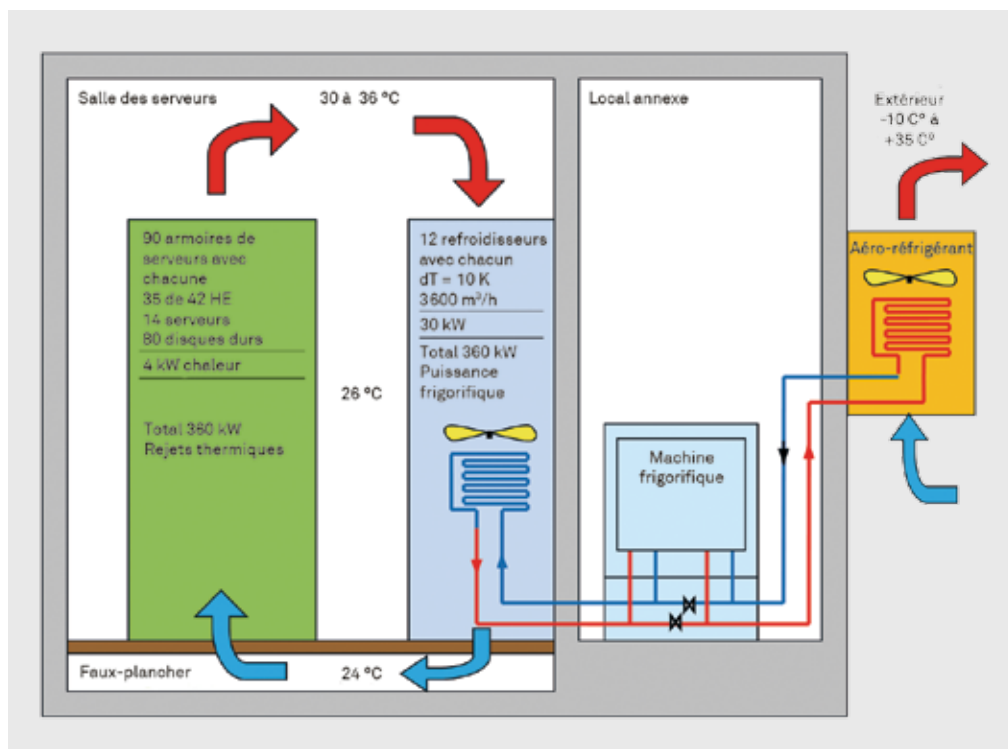


Illustration 10: Locaux de serveurs Free Cooling. (Source: energie.ch, 2017)

Exemple 4: circuit de compression

Etape 1: évaporateur

Dans l'illustration 11, le fluide frigorigène dans l'évaporateur est évaporé sous une pression de 1 bar à un niveau de température de -20°C . Pour refroidir un quelconque fluide ou masse, l'évaporateur doit être plus froid que le produit à refroidir. Dans cet exemple, le produit à refroidir possède une température de -10°C . Ainsi, la chaleur peut être absorbée par l'évaporateur par une différence de température de 10 K (entre l'évaporateur et le produit à refroidir). Le produit à refroidir. Sur l'échelle inférieure, la modification de l'enthalpie (capacité thermique par masse) de 270 kJ/kg à 420 kJ/kg est visible, ce qui donne une différence de 150 kJ par kg de fluide frigorigène.

Etape 2: compresseur

Dans le compresseur, la compression du fluide frigorigène gazeux à 10 bars fait grimper la température à 80°C . L'enthalpie augmente ainsi de 420 kJ/kg à 470 kJ/kg, c'est à dire d'une valeur de 50 kJ/kg. Il en résulte ainsi pour la machine frigorifique un coefficient d'efficacité énergétique de 3,0 ($\text{EER} = (150 \text{ kJ/kg}) / (50 \text{ kJ/kg}) = 3$). Le maximum théorique serait un coefficient d'efficacité énergétique de 6,6 ($\text{EER} = (263 \text{ J/kg}) / (40 \text{ J/kg}) = 6,6$). Un coefficient d'efficacité énergétique de 3 correspond ainsi à un rendement de 45 % (sans prise en compte des autres déperditions dans le moteur d'entraînement et les accessoires).

Etape 3: condenseur

Dans le condenseur, le fluide frigorigène gazeux est désurchauffé de 80 à 40°C , puis condense par la suite. L'enthalpie diminue dans le condenseur de 470 kJ/kg à 270 kJ/kg, ce qui correspond à la somme des précédentes augmentations de l'enthalpie dans l'évaporateur et le compresseur. Afin que le fluide frigorigène condense et puisse céder de la chaleur, le condenseur doit être plus chaud que la température ambiante. Dans cet exemple, la température de condensation de 40°C est supérieure de 10 K à la température ambiante de 30°C (illustration 11). On voit également dans cette représentation que lorsque la température de condensation augmente, l'émission de chaleur diminue, jusqu'à ce que le fluide frigorigène devienne incondensable et que la machine frigorifique ne refroidisse plus.

Etape 4: organe d'expansion

Dans l'illustration 12, la température ambiante est de 50°C et la température de condensation, conformément aux hypothèses de l'illustration 11, est plus élevée de 10 K, c'est-à-dire d'environ 60°C . On voit que le refroidissement dans l'évaporateur commence comme auparavant à -20°C . L'absorption de chaleur (refroidissement) est désormais de 290 kJ/kg à 420 kJ/kg, ce qui donne une différence de 130 kJ/kg. Le condenseur doit condenser à une pression de 20 bar et augmente l'enthalpie de 420 kJ/kg à 480 kJ/kg, soit une différence de 60 kJ/kg. Le coefficient d'efficacité énergétique se dégrade ainsi à

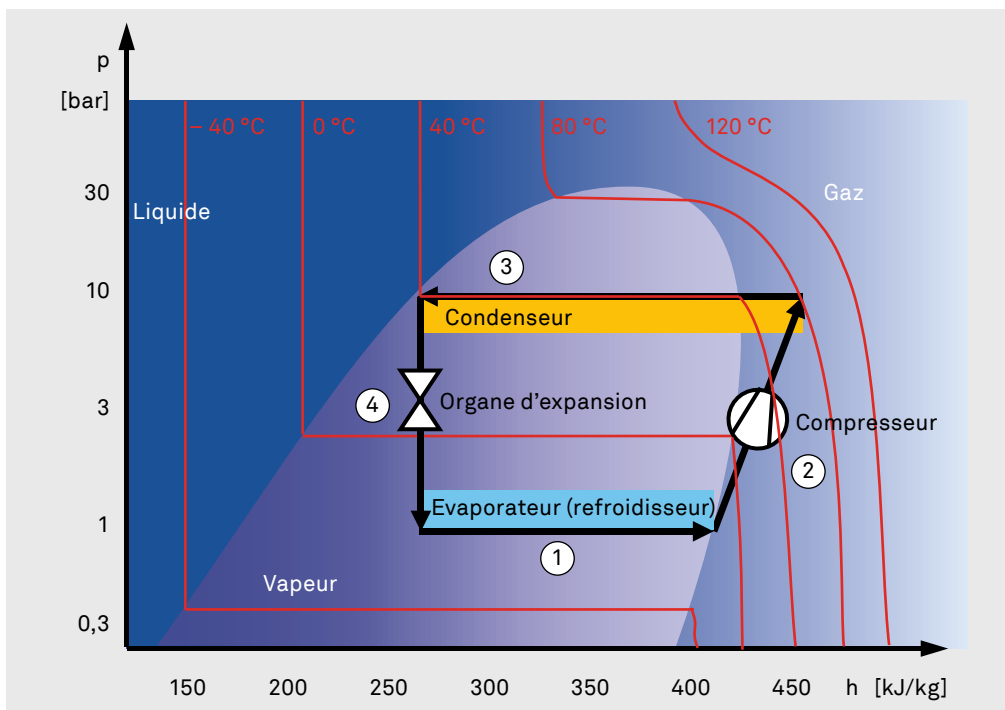


Illustration 11: Diagramme enthalpie-pression d'une machine frigorifique avec une température de refroidissement de -10°C et température ambiante de 30°C . (Source: energie.ch, 2017)

une valeur de 2,2 ($EER = (130 \text{ kJ/kg}) / (60 \text{ kJ/kg}) = 2,2$). Le maximum théorique serait un coefficient frigorifique de 4,4 ($EER = (263 \text{ kJ/kg}) / (60 \text{ kJ/kg}) = 4,4$). Un coefficient frigorifique de 2,2 correspond ainsi à un rendement de 50 % (sans prise en compte des autres déperditions).

Sous-refroidissement

Lorsque de l'eau de refroidissement est disponible, il est possible, après la condensation avec la chaleur ambiante, de continuer à refroidir le fluide frigorigène

avec de l'eau. On définit cette possibilité, représentée dans l'illustration 13 (sur la base de l'illustration 11), «sous-refroidissement». Ainsi, le refroidissement dans l'évaporateur commence comme auparavant à -20°C , et se poursuit à gauche. L'absorption de chaleur (refroidissement) est désormais de 240 kJ/kg à 420 kJ/kg , ce qui donne une différence de 180 kJ/kg . Le compresseur doit, comme dans l'illustration 11, compresser à une pression de 10 bars et augmente ainsi l'enthalpie de 50 kJ/kg (de 420 kJ/kg à 470 kJ/kg).

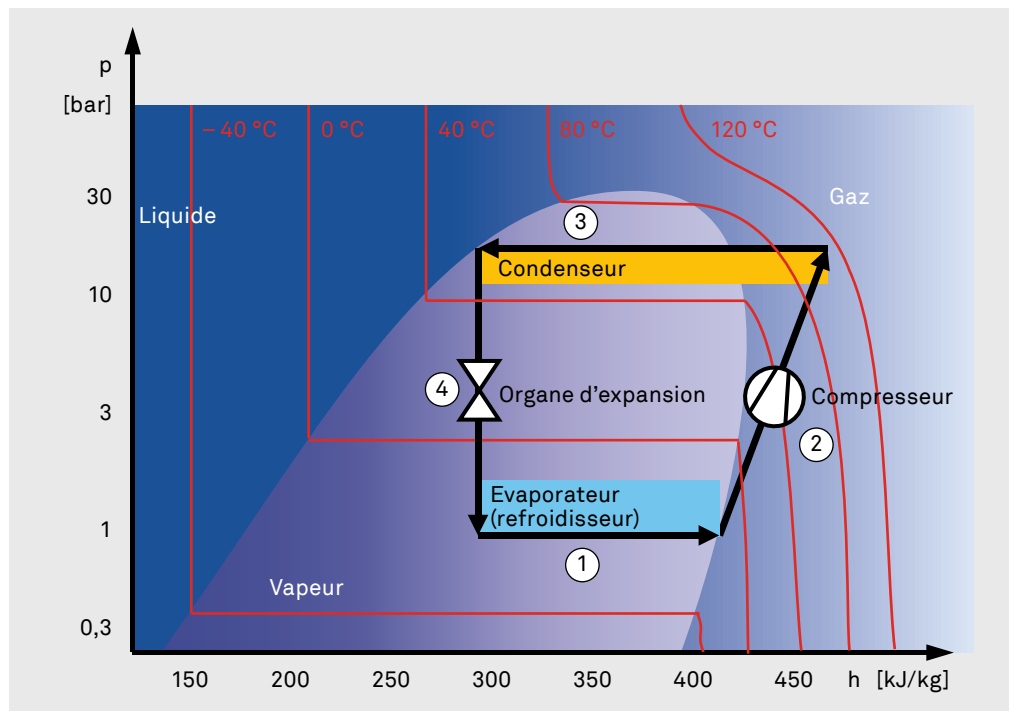


Illustration 12: Diagramme enthalpie-pression d'une machine frigorifique avec une température de refroidissement de -10°C et une température ambiante de 50°C . (Source: energie.ch, 2017)

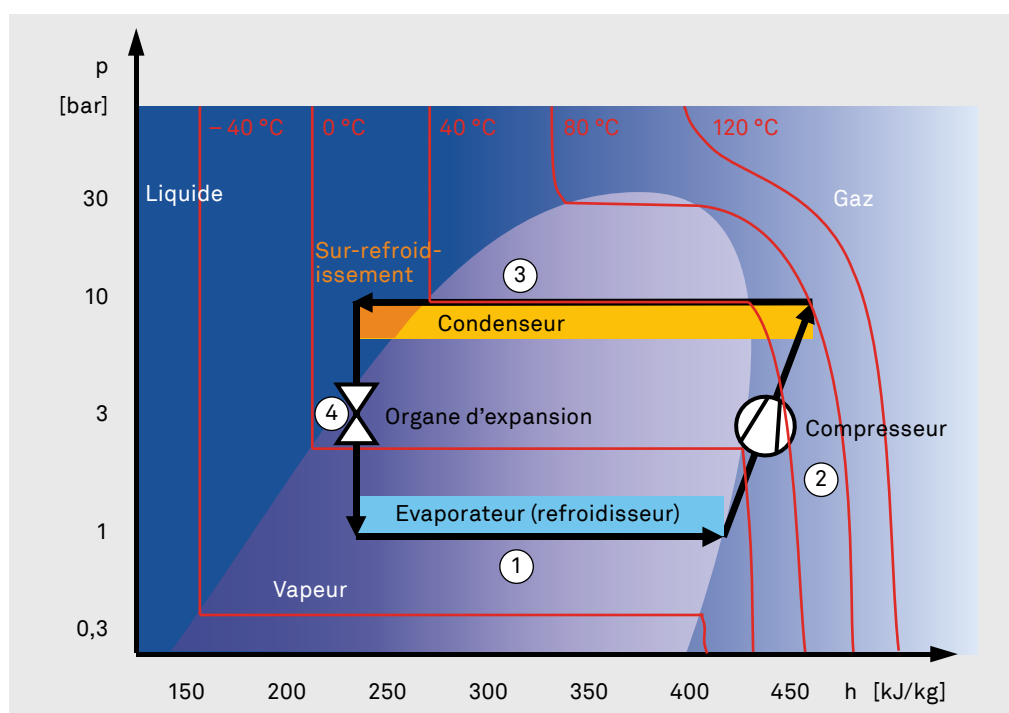


Illustration 13: Diagramme enthalpie-pression d'une machine frigorifique avec une température de refroidissement de -10°C , une température ambiante de 30°C et une eau de refroidissement de 15°C . (Source: energie.ch, 2017)

Le coefficient d'efficacité énergétique s'améliore ainsi à une valeur de 3,6 ($EER = (180 \text{ kJ/kg}) / (50 \text{ kJ/kg}) = 3,6$). Le maximum théorique serait, rapporté à la chaleur environnementale, un coefficient d'efficacité énergétique de 6,6 ($EER = (263 \text{ J/kg}) / (40 \text{ J/kg}) = 6,6$). Un coefficient frigorifique de 3,6 correspond ainsi à un rendement de 55 % du maximum théorique. Par rapport au niveau de température de l'eau de refroidissement de 15 °C, on obtient toutefois un coefficient d'efficacité énergétique de 10,5 ($EER = (263 \text{ kJ/kg}) / (25 \text{ kJ/kg}) = 10,5$), ce qui correspond encore à un rendement de 34 %. Néanmoins, étant donné que la majeure partie du refroidissement (470 kJ/kg à $270 \text{ kJ/kg} = 200 \text{ kJ/kg}$) s'effectue avec de la chaleur environnementale et que seule une petite partie (270 kJ/kg à $240 \text{ kJ/kg} = 30 \text{ kJ/kg}$) s'effectue avec l'eau de refroidissement, le sous-refroidissement est une mesure efficace, notamment lorsque de l'eau de refroidissement n'est disponible qu'en quantité limitée.

Si l'on élève la température de refroidissement, le coefficient d'efficacité énergétique augmente également. Une amélioration supplémentaire engendre une réduction des déperditions de température dans les deux échangeurs de chaleur (évaporateur et condenseur) (illustration 14).

Plus la température de refroidissement est proche de la température ambiante, plus la déperdition de température dans les échangeurs de chaleur est importante. La déperdition de température d'un échangeur de chaleur dépend des conditions d'écoulement, de la

résistivité thermique et du dimensionnement de la surface d'échange (surface d'échangeur de chaleur). Plus la surface d'échange de l'échangeur de chaleur est importante, meilleur est le rendement, mais plus il est en général coûteux.

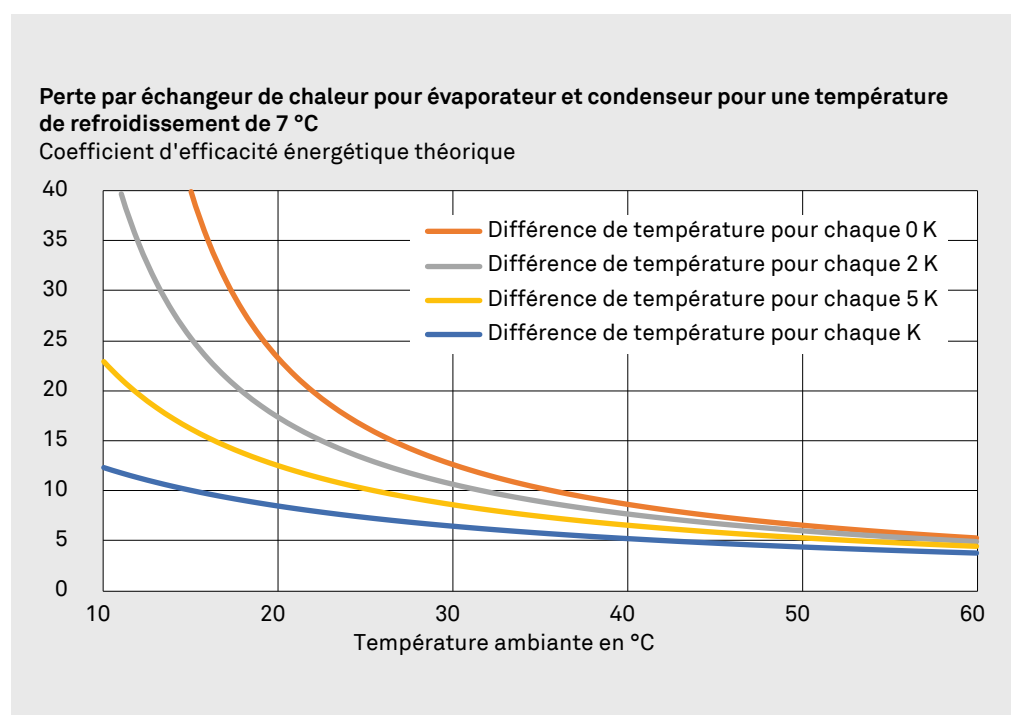


Illustration 14: Coefficient d'efficacité énergétique théorique maximal pour une température de refroidissement de 7 °C en fonction de la température ambiante et pour différents échangeurs de chaleur (évaporateur et condenseur) 0 K, 2 K, 5 K et 10 K différence de température. (Source: energie.ch, 2017)

Informations complémentaires

Notions et unités

Abréviation	Désignation
AUL	Air extérieur
URT	Utilisation des rejets thermiques
BoN	Exploitation sans utilité
COP	Coefficient de performance
EER	energy efficiency ratio
FOL	Air évacué
KVS	Système de circuit mixte
KWS	Production d'eau glacée
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
RC	Récupération de chaleur

Note éditoriale

La fiche technique Installations frigorifiques dans l'industrie a été élaborée par Impact Energy dans le cadre du programme de mise en œuvre pour des systèmes d'entraînement Topmotors. Avec la collaboration de Conrad U. Brunner (iE), Oliver Gässler (E&P), Denis Pereira et Daniel Keller (Clima Net), Robert Dumortier, Rolf Gloor (Gloor Engineering) et Rolf Tieben (iE).
Traduction: Ilsegret Messerknecht. Mise en page: Noemi Bösch

Normes, lois et sources

- Ecodesign ordonnance 640/2009 Moteurs
- Ordonnance sur l'énergie OEne, annexe 2.10: Moteurs électriques
- VDI 2048 Contrôle et amélioration de la qualité des données énergétiques de process et leurs incertitudes au moyen d'un calcul de correction pour le test opérationnel et d'acceptation
- IEC 60034-30-1:2014-12 Machines électriques triphasées – Partie 30-1: Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (Code IE)
- Campagne de l'OFEN: Froid efficace, www.effizientekaelte.ch
- SN EN 378-1:2017 Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur