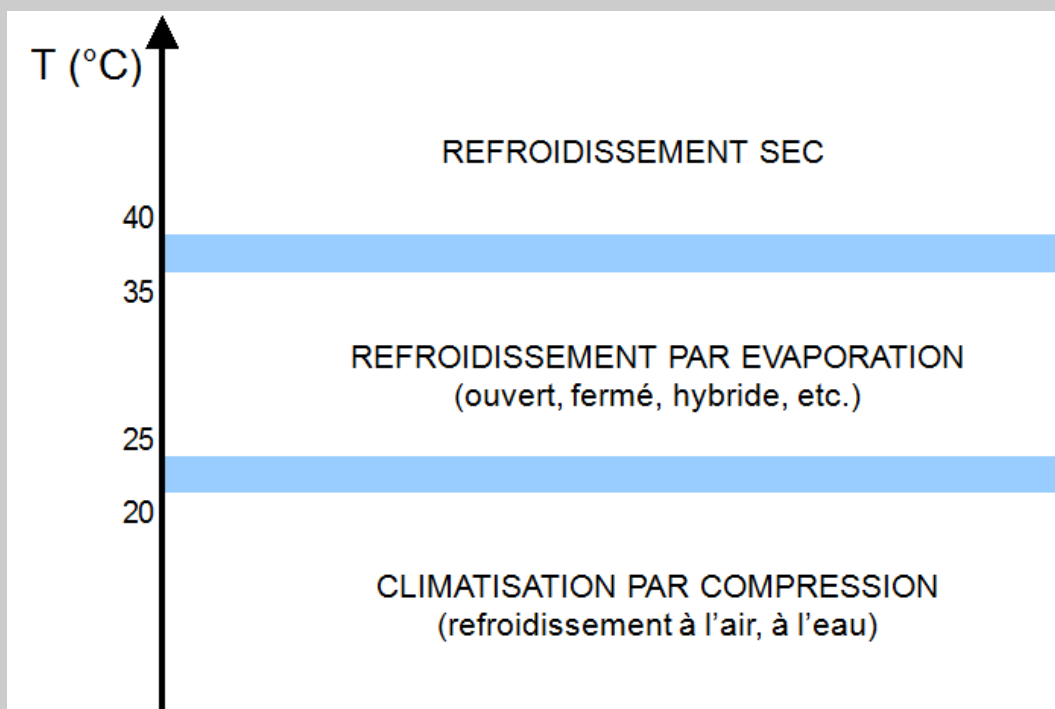


Nico Vanden Brroeck

Laborelec
Juillet 2010



Efficacité énergétique

fr.leonardo-energy.org

Table des matières

1.	Introduction	3
2.	Refroidissement sec	4
2.1	Avantages et inconvénients	4
2.2	Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement sec	5
3.	Refroidissement par évaporation	5
3.1	Avantages et inconvénients	5
3.2	Différents types de tours de refroidissement.....	6
3.2	Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement par évaporation	9
4.	Refroidissement par compression	10
4.1	Cycle de Carnot théorique et réel	10
4.2	Arrangements à compresseurs multiples.....	14
4.3	Rendement - Coefficient de performance	16
4.4	Ammoniac et autres fluides réfrigérants	17
4.5	Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement par compression	18
5.	Conclusions	20
6.	Références et bibliographies	21

1. Introduction

La consommation énergétique associée à la production de froid industrielle représente 7% de la consommation totale d'électricité de l'Europe Occidentale. D'un point de vue général, le froid est une énergie chère. Plus la température requise est basse et plus le dispositif de production de froid est onéreux, il convient donc de respecter les règles suivantes :

- l'utilisation de froid doit être limitée au plus que faire se peut ;
- les technologies de production de froid doivent être performantes.

Selon la température souhaitée du fluide à refroidir, on a recourt à l'une des 3 principales technologies de production de froid (représentant plus de 90% du marché industriel) : le refroidissement sec, par évaporation et par compression.

Il existe d'autres technologies de production de froid, telles que le refroidissement par absorption, par expansion de gaz ou encore thermo-électrique. Toutefois, du fait de leurs faibles représentations dans l'industrie, ces technologies ne seront pas abordées dans ce document.

Le critère essentiel de choix de la technologie la plus adaptée est la température à atteindre (figure 1).

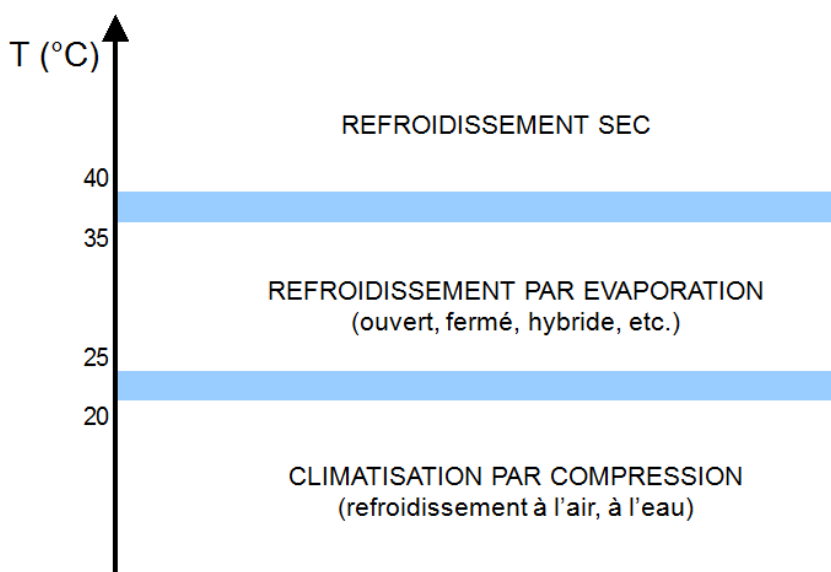


Figure 1 : principaux modes de refroidissement classés par températures usuelles de travail

Le refroidissement par compression consomme beaucoup plus d'énergie que le refroidissement par évaporation qui, lui-même, consomme beaucoup plus que le refroidissement sec. Il est donc primordial de correctement choisir la technique de refroidissement adaptée à la nature de l'application.

2. Refroidissement sec

Le refroidissement sec utilise l'air ambiant pour refroidir un fluide caloporteur pouvant être gazeux ou liquide. Ce mode de refroidissement est souvent utilisé lorsque le medium ne doit être refroidi que de quelques degrés en deçà de la température ambiante.

Les applications types sont le refroidissement des compresseurs à air comprimé, les climatiseurs d'installations climatisées, etc.

2.1 Avantages et inconvénients

Ce mode de production de froid utilise l'air ambiant comme medium de refroidissement. L'air est pulsé au travers d'un échangeur qui vient refroidir le fluide caloporteur. Cette technique présente les avantages suivants :

- pas de consommation d'eau (et donc pas de frais associés à ce type de consommation) ;
- pas de frais associés à une installation de traitement de l'eau ;
- maintenance réduite.

Les inconvénients du refroidissement sec, en comparaison à la production de froid par évaporation, sont :

- l'obtention de la température la plus basse dépend de la température sèche de l'air ambiant (la température d'air sec est la température de l'air mesurée par un thermomètre protégé des effets de l'humidité et des radiations) ;
- la surface de l'échangeur de chaleur entre l'air ambiant et le médium de refroidissement (eau ou solution aqueuse glycolée) est plus importante pour la même quantité d'énergie transmise ;
- la consommation électrique des ventilateurs est importante comparativement aux ventilateurs d'une tour de refroidissement.

2.2 Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement sec

Les systèmes de production de froid étant en règle générale installés en extérieur, ils sont exposés à la pollution de leur environnement : feuilles mortes, nids d'oiseau, etc. peuvent venir perturber les écoulements d'air par obstruction de l'échangeur de chaleur. Il est donc nécessaire de procéder à des nettoyages réguliers de l'échangeur et des filtres afin de permettre un meilleur rendement du système.

L'air circulant au travers de l'échangeur doit être le plus froid possible. Le système ne doit donc pas être installé à proximité de sources de chaleur (i.e. cheminée d'évacuation d'air chaud sur le toit).

Une même puissance thermique peut être obtenue grâce à un climatiseur avec un échangeur à faible rendement et des ventilateurs de forte puissance, ou par un climatiseur avec échangeur à haut rendement et des ventilateurs de puissance plus réduite. Dans le second cas, l'investissement à l'achat est plus important mais la consommation plus faible des ventilateurs est avantageuse sur le long terme et c'est donc ce type de solution qui devra être retenue.

La température de refroidissement du médium chaud doit être la plus élevée possible dans la limite acceptable. En effet, la consommation électrique est directement proportionnelle à la différence de température entre l'air en entrée et le médium à refroidir. Par exemple, si une température de refroidissement de 40°C est acceptable, il est aberrant de refroidir à 35°C, car cela se traduira par une plus forte consommation des ventilateurs. Il est intéressant pour cela de connaître les températures maximales au-delà desquelles des altérations matérielles sont observées. La température de refroidissement souhaitée pour une application doit apparaître dans les notices d'utilisation des équipements.

L'agencement et le contrôle des installations de climatisation doivent être optimisés afin d'augmenter le rendement du système. Des différents modes de contrôle (fréquence variable, en cascade, on/off, etc.), il doit être retenu celui permettant les économies les plus importantes au meilleur coût d'installation.

3. Refroidissement par évaporation

3.1 Avantages et inconvénients

Cette technique utilise les propriétés de l'évaporation de l'eau pour refroidir le médium. Le paramètre le plus important est donc la température de bulbe mouillée, mesurée par un thermomètre dont l'embout est placé dans une « chaussette » maintenue humide par effet de mèche (drainage de l'eau par capillarité le long d'une mèche).

Efficacité énergétique

fr.leonardo-energy.org

Ce type de thermomètre est désigné sous l'appellation : *thermomètre à bulbe-globe mouillé*.

Pour une humidité relative inférieure à 100 %, l'eau s'évapore de la chaussette et, par effet d'évaporation, refroidit le bulbe à une température inférieure à la température ambiante.

Pour une température sèche donnée de l'air ambiant, une baisse de l'humidité relative aura pour conséquence une différence plus importante entre les températures de bulbe sec et de bulbe mouillé. La valeur précise d'humidité relative est déterminée en relevant les températures de bulbe sec et de bulbe mouillé sur un abaque.

Grâce à cela, des températures inférieures à 21°C peuvent être obtenues, même pendant les étés les plus chauds lorsque la température d'air sec est supérieure à 25°C.

Les avantages du refroidissement par évaporation, comparativement au refroidissement sec, sont les suivants :

- meilleur échange de chaleur ayant pour conséquence :
 - ◇ une surface occupée au sol moindre
 - ◇ une consommation électrique moins importante

L'inconvénient majeur réside dans les coûts additionnels liés à l'utilisation de l'eau (remplacement de l'eau perdue et traitement de l'eau) pouvant être importants pour les tours de grande taille.

3.2 Différents types de tours de refroidissement

Il existe trois types distincts de tours de refroidissement :

- tour de refroidissement ouverte
- condenseur à évaporation et tour de refroidissement fermée
- tour de refroidissement hybride

Tour de refroidissement ouverte

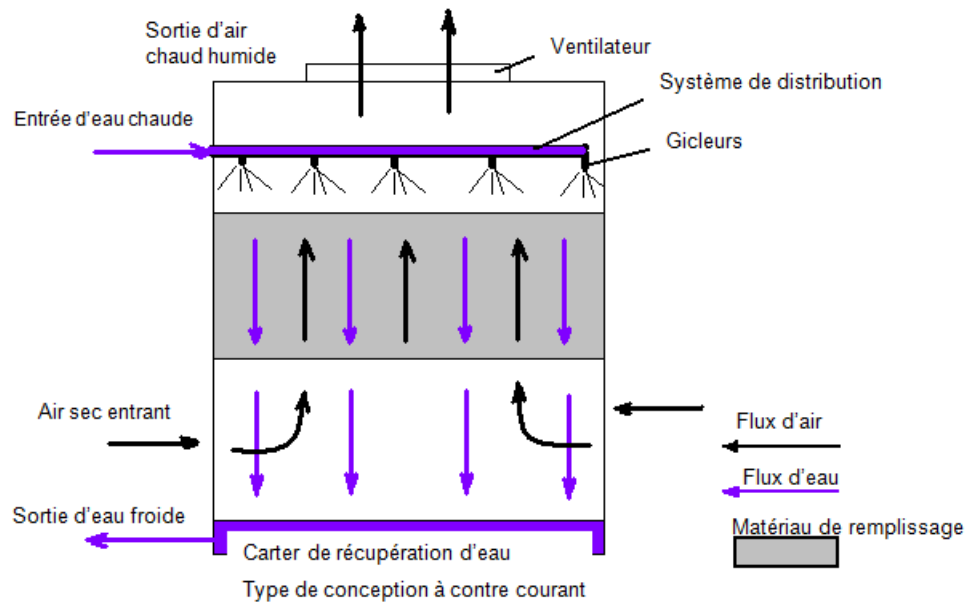


Figure 2 : principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement ouverte

Fonctionnement :

De l'eau chaude en provenance d'un process est diffusée par le haut à l'intérieur d'une tour de refroidissement et descend progressivement par gravité. Dans le même temps, de l'air est pulsé verticalement dans le sens inverse afin que les deux fluides se mélangent. L'eau s'évapore partiellement et, ce faisant, absorbe de la chaleur aux gouttelettes d'eau. En bas de la tour, l'eau refroidie est accumulée dans un collecteur et peut être réutilisée par le process à refroidir.

Efficacité énergétique

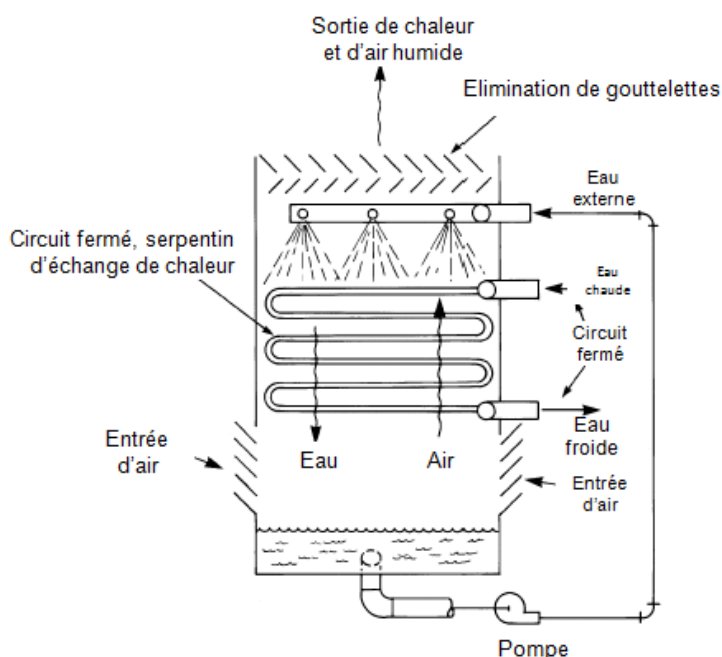


Figure 3 : principe de fonctionnement d'un condenseur à évaporation

Le principe de fonctionnement d'un condenseur à évaporation est le même que celui d'une tour à refroidissement fermée, à la nuance près que le fluide réfrigérant en entrée est sous forme gazeuse puis condensé sous forme liquide dans le condenseur alors que dans la tour fermée, l'eau est simplement refroidie.

Les condenseurs à évaporation permettent d'absorber la chaleur de nombreux types de systèmes. Le principe de fonctionnement est le suivant : la vapeur à condenser circule le long d'un serpentin de condensation maintenu humide en permanence sur sa partie extérieure grâce à un système de circulation de l'eau (fonctionnant sur le même principe qu'une tour de refroidissement ouverte). De l'air est pulsé sur le serpentin de telle façon qu'une petite partie de l'eau en circulation s'évapore. Le processus d'évaporation utilise l'énergie du réfrigérant gazeux à l'intérieur du serpentin entraînant ainsi sa condensation.

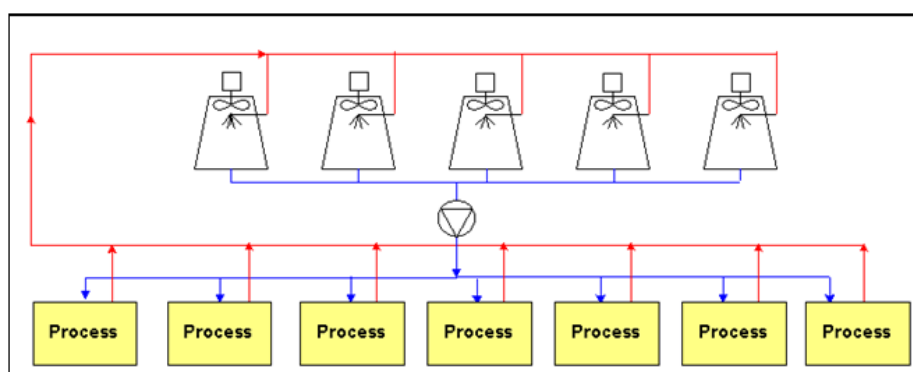


Figure 4 : exemple de tour de refroidissement ouverte

Tour de refroidissement hybride

Selon les conditions externes, trois types de fonctionnement existent pour ce type de tour :

- mode sec (à l'instar d'un climatiseur sec)
- mode adiabatique (à l'instar d'une tour de refroidissement fermée)
- mode sec-humide (combinaison permettant d'obtenir des performances maximales)

Du fait du niveau élevé de l'investissement initial (environ 5 fois supérieur à celui d'une tour de refroidissement fermée), les tours de refroidissement hybrides ne présentent un intérêt que si le coût de l'eau est supérieur à 1,5 €/m³. De ce fait, les tours de refroidissement hybrides ne présentent un intérêt que dans le cadre de la réduction des émissions de vapeur d'eau. Le point fort de cette technologie est de mettre l'accent sur l'économie d'eau et pas l'économie d'énergie.

3.3 Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement par évaporation

Dans une tour de refroidissement, le rôle du ventilateur est de pulser l'air au travers de la tour afin de générer une évaporation partielle de l'eau. Les paramètres de régulation du débit d'air sont la quantité de chaleur de la tour et la température ambiante de l'air. La plupart des régulations des ventilateurs sont de types ON/OFF ou effectuées par le biais de moteurs à deux vitesses. Selon la quantité de chaleur contenue dans la tour, des économies substantielles peuvent être réalisées grâce à l'utilisation de variateurs de vitesse (fréquence variable) pour contrôler la vitesse de rotation des ventilateurs.

Quels avantages présentent les variateurs de vitesse ?

Le débit d'air d'un ventilateur (mais cela est aussi vrai pour le débit de fluide en sortie de pompes), est proportionnel à la vitesse de rotation du ventilateur, selon la formule

suivante :
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

où P représente la puissance électrique exprimée en kW et n la vitesse de rotation du ventilateur. Sur un plan énergétique, on en déduit que si la vitesse de rotation du ventilateur peut être réduite de 80 % en changeant la fréquence de 50Hz à 40Hz, cela aura pour effet une diminution de la puissance électrique appelée de 0,8³ (= 0,512)!

L'obtention du même débit (80 % de la valeur nominale) en utilisant une régulation de type ON/OFF entraînerait une diminution de la consommation énergétique de 80 % seulement. On comprend dès lors l'intérêt que représentent les variateurs de vitesse en

termes d'économies d'énergie. Le potentiel exact d'économie dépend directement de la charge et du réglage de la tour de refroidissement.

- L'ensemble du processus de refroidissement dépend fortement de l'efficacité de l'échange de chaleur avec l'environnement. Le plus souvent, l'eau contient un certain nombre d'éléments organiques ainsi que de la chaux. En cas d'accumulation de ces éléments dans l'échangeur, l'efficacité d'échange s'en voit fortement réduite. Un traitement adéquat de l'eau doit donc être mis en place en fonction de la qualité première de l'eau utilisée.
- La phase de conception est essentielle dans le choix (ou la conception) des pompes. Les contrôles doivent être réalisés avec des variateurs de vitesse. Les dispositifs d'accélération doivent être évités.
- Comme nous l'avons précédemment mentionné, le refroidissement devient d'autant plus onéreux que la température requise diminue. Une réévaluation régulière des températures est donc nécessaire.
- Les systèmes de contrôle de la demande en air froid basés sur un système de contournement ne sont pas efficaces.

4. Refroidissement par compression

4.1 Cycle de Carnot théorique et réel

Les systèmes de refroidissement par compression utilisent un liquide réfrigérant dont le point d'ébullition est inférieur à celui de l'eau. Or, on montre que le point d'ébullition des fluides est d'autant plus faible que la pression est basse. Sur la base de cette propriété et par des techniques de compression et de détente, il est possible d'évaporer un fluide frigorigène à basse température et de le condenser à haute température. A basse température (Température d'évaporation T_{ev}), la chaleur est absorbée dans le liquide à refroidir. A haute température (Température de condensation T_{cd}), la chaleur est transmise à l'environnement.

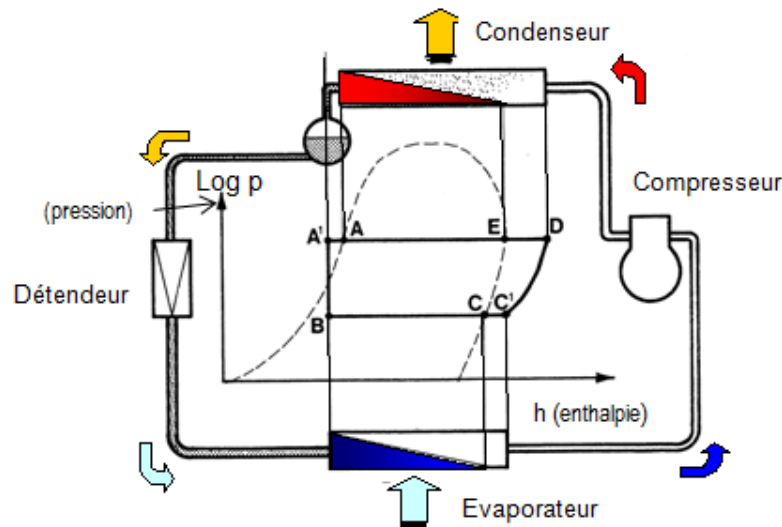


Figure 5 : diagramme de Mollier

La figure 5 représente le diagramme de Mollier où l'on distingue les différents états du fluide réfrigérant pendant le cycle de refroidissement.

Les principaux éléments d'un cycle de refroidissement par compression sont :

- le compresseur
- le condenseur
- la valve d'expansion
- l'évaporateur

Le type de compresseur le plus commun est le compresseur à piston, mais d'autres types de compresseurs sont de plus en plus utilisés, notamment les compresseurs centrifuges ou les compresseurs à vis. Le compresseur à piston couvre une très large gamme de puissance, depuis le modèle à piston simple de petit diamètre utilisé pour les réfrigérateurs domestiques, aux modèles à 8 ou 10 cylindres au volume plus important utilisés pour les applications industrielles.

Les compresseurs hermétiques sont utilisés pour les applications les plus petites : compresseur et moteur sont fabriqués en une seule unité hermétique.

Pour les applications plus importantes, on utilise des compresseurs semi-hermétiques dont l'avantage principal est d'éviter l'utilisation de joints d'étanchéité sur l'arbre moteur, et donc d'éviter des opérations de maintenance difficiles lorsque ces derniers présentent des fuites. Toutefois, ce mode de conception ne peut être utilisé pour des modèles dont le fluide frigorigène est à base d'ammoniac à cause de la corrosion des enroulements du moteur.

Efficacité énergétique

fr.leonardo-energy.org

C'est la raison pour laquelle les compresseurs de fortes puissances fonctionnant au fréon ou à l'ammoniac sont des modèles de type ouvert, c'est-à-dire pour lesquels le moteur est situé à l'extérieur du carter. La transmission de puissance peut alors être directe ou assurée par une courroie en V.

Pour certaines applications spéciales, il existe des compresseurs sans huile, bien que la lubrification des roulements et des parois des cylindres soient normalement toujours nécessaires. Pour les compresseurs de refroidissement de forte puissance, la circulation de l'huile est assurée par une pompe à huile.

Condenseur

Le condenseur est utilisé pour évacuer la chaleur absorbée dans l'évaporateur et la chaleur produite par l'action de compression. Si le condenseur refroidit le fluide réfrigérant plus que nécessaire (sous-refroidissement), le potentiel de refroidissement de l'installation augmente du fait de l'augmentation du potentiel d'absorption de chaleur par l'évaporateur.

De plus, le sous-refroidissement permet d'éviter la formation de « Vapeur Instantanée », phénomène pouvant apparaître lorsque la valve d'expansion n'est pas alimentée avec un fluide parfaitement liquide mais un mélange de liquide et de gaz.

Ce phénomène peut être dû :

- à un condenseur non approprié (ailes du condenseur abîmées, ou condenseur sous-dimensionné) ;
- à une baisse de la pression de condensation dans le conduit situé en amont de la valve d'expansion ;
- à une augmentation de chaleur dans le conduit due à une température ambiante trop élevée.

En quoi la vapeur instantanée est elle un problème ?

- Le gaz présent dans le fluide réfrigérant a pour effet d'en augmenter le volume. L'orifice de la valve d'expansion est trop petit pour permettre de laisser passer suffisamment de fluide vers l'évaporateur. De ce fait, toute la surface de l'évaporateur n'est pas utilisée, ce qui a pour effet de rendre l'ensemble du système de refroidissement instable.

La formation de vapeur instantanée peut être évitée en augmentant le sous-refroidissement. La vapeur instantanée se présente sous la forme de bulles dans le manchon en verre situé juste en amont de la valve d'expansion. En fonctionnement normal, il ne devrait pas y avoir de bulles dans le réfrigérant.

Toutefois, si l'augmentation du sous-refroidissement devient trop importante, le fonctionnement du dispositif de refroidissement peut être altéré et les perturbations suivantes peuvent apparaître :

- diminution de la capacité de l'évaporateur ;
- diminution de la pression d'évaporation sur les installations ne comprenant pas régulateurs ;
- fonctionnement instable de la valve d'expansion.

Il existe de nombreux types de condenseurs différents :

Le condenseur à tube et calandre, utilisé pour les applications où la quantité d'eau de refroidissement est suffisante. Ce type de condenseur est constitué d'un tube horizontal soudé aux embouts à deux viroles terminales servant de support aux tubes de refroidissement. Les viroles sont emboîtées dans des flasques latérales.

Le fluide réfrigérant circule au travers du cylindre et l'eau de refroidissement circule au travers des tubes. Les flasques latérales sont séparées en plusieurs veines. Les différentes sections jouent le rôle de chambres réversibles et permettent à l'eau de circuler plusieurs fois au travers du condenseur. On considère que la température de l'eau augmente approximativement de 5 à 10°C à chaque passage au travers du condenseur. Une variante de ce système existe : c'est l'échangeur à plaques.

S'il s'avère nécessaire de réduire la quantité d'eau, un condenseur à évaporation peut être utilisé. Dans certains cas, il n'est pas possible d'utiliser de l'eau pour le procédé de condensation. Il convient alors d'utiliser des condenseurs à air. Ces deux types de condenseurs sont décrits dans le chapitre précédent.

Valve d'expansion

Comme nous l'avons précédemment expliqué, le but de la valve d'expansion est de réduire la pression du fluide. Les valves d'expansion thermostatiques sont les plus communément utilisées pour les dispositifs d'accélération ou d'expansion des systèmes de refroidissement. La valve d'expansion thermostatique régule le flux du fluide réfrigérant vers l'évaporateur en fonction du degré de surchauffe du gaz réfrigérant en sortie de l'évaporateur. Ce type de valve est constitué d'un corps de valve associé à un ressort, un diaphragme et un bulbe thermostatique situé en sortie de l'évaporateur. Le bulbe est connecté à la partie supérieure du diaphragme grâce à un tube capillaire.

Si la température en amont du compresseur est trop importante, cela signifie que le flux au travers de l'évaporateur n'est pas assez important pour satisfaire la demande en froid. Dans ce cas, l'orifice de la valve doit être agrandi pour permettre un flux plus important de fluide réfrigérant dans l'évaporateur.

Efficacité énergétique

fr.leonardo-energy.org

Les valves d'expansion électroniques permettent un contrôle plus sophistiqué du flux de fluide réfrigérant augmentant ainsi le rendement et l'efficacité énergétique de l'ensemble. Trois principaux types de valves électroniques sont aujourd'hui largement disponibles : les valves à moteurs pas à pas, les valves à modulation de largeur d'impulsion et les valves analogiques.

En comparaison aux valves d'expansion thermostatiques, les avantages des valves d'expansion électroniques sont les suivants :

- contrôle plus précis des températures (meilleure conservation des produits) ;
- contrôle de surchauffe à un niveau constant pour des pressions de refoulement fluctuantes ;
- fonctionnement possible à bas niveau de pression de refoulement pour des températures ambiantes plus faibles ;
- meilleure efficacité énergétique ;
- contrôle du floating haute pression (par réduction de la température de condensation, le rendement des installations de refroidissement augmente). Ce type de contrôle fonctionne mieux avec une valve électronique qu'avec une valve thermostatique.

Dispositifs d'évaporation

Selon le type d'application, de nombreuses exigences sont imposées à l'évaporateur, ce qui en justifie leurs diversités.

Les évaporateurs à circulation naturelle de l'air sont de moins en moins utilisés du fait de la médiocrité d'échange de chaleur entre l'air et les tubes. Les premières versions utilisaient des tubes pleins, remplacées aujourd'hui par des multitubes ou des éléments à ailettes.

Le rendement des évaporateurs peut être augmenté de façon significative par utilisation de circulation d'air forcée. L'augmentation de la vitesse de l'air améliore l'échange de chaleur entre l'air et le tube, ce qui permet, pour un apport de froid donné, l'utilisation d'un évaporateur de surface plus réduite, comparativement à une circulation naturelle.

Comme son nom l'indique, un échangeur de chaleur à refroidissement liquide refroidit un liquide. La méthode la plus simple consiste à immerger un serpent tubulaire dans un réservoir ouvert. Des systèmes fermés sont de plus en plus souvent utilisés. Les tubes de refroidissement utilisés sont alors similaires aux condenseurs à tube et calandre.

4.2 Arrangement à compresseurs multiples

L'utilisation d'un compresseur unique pour assurer le refroidissement d'une chambre de stockage climatisée ne constitue pas toujours la meilleure solution. En effet, un

compresseur unique peut s'avérer être surdimensionné pendant la majeure partie de l'année, ce qui a pour effet de faire chuter la température d'évaporation et avoir comme conséquences :

- un mauvais rendement du compresseur ;
- des mises en marche de courte durée et répétitives du compresseur ;
- une augmentation de l'effet de séchage du côté de l'évaporateur ;
- une formation plus importante de glace sur l'évaporateur qui aura pour résultat une augmentation des cycles de dégivrage.

De plus, la consommation énergétique est alors plus importante.

Pour une conception optimisée de l'installation, les éléments suivants doivent être pris en compte :

Compression à multi-étages

Les systèmes à compression à multi-étages permettent d'obtenir des différences de température plus importantes (i.e. ratios de pression) pour une consommation énergétique moindre. Exemple : une machine à refroidissement avec une température de condensation de 38°C et une température d'évaporation de -40°C, avec les résultats suivants :

- compression à étage simple : consommation énergétique 100%
- deux étages de compression : consommation énergétique 80%
- trois étages de compression : consommation énergétique 77%

L'investissement initial dépend du nombre d'étages. Une analyse des coûts doit donc être menée pour choisir au mieux le nombre d'étages en fonction du besoin.

Compresseurs multiples installés en parallèle dont l'un est équipé de variation de vitesse

Si l'un des compresseurs est équipé d'un variateur de vitesse, il convient que sa puissance soit double de la puissance du plus petit compresseur du groupe, car le variateur de vitesse ne permet de diminuer la capacité du compresseur que de 50 %.

Avantages :

- contrôle très précis de la température d'évaporation,
- limitation du nombre de cycles de démarrage,
- haut rendement.

Inconvénients :

- le compresseur équipé de variation de vitesse fonctionnera la plupart du temps,
- coûts d'investissement initiaux plus importants (mais retour sur investissement important du fait de la baisse de consommation d'énergie).

4.3 Rendement – Coefficient de performance

Le rendement d'un climatiseur peut être exprimé comme le ratio entre la capacité de refroidissement thermique de l'installation et la consommation électrique du compresseur. On désigne souvent le rendement comme un coefficient de performance (COP). Une installation de production de froid avec un coefficient de performance de 4 signifie que pour chaque unité d'énergie électrique consommée, 4 unités d'énergie de refroidissement sont produites.

$$COP = \frac{P_{th_évaporateur}}{P_{électrique}} = \frac{P_{th_évaporateur}}{P_{e_condenseur} - P_{e_évaporateur}} = \frac{T_{cd}}{T_{cd} - T_{ev}} \times \eta$$

A cause des nombreuses pertes du système (chaleur et pression), le coefficient de performance du cycle de compression de Carnot théorique doit être multiplié d'un facteur η . Ce facteur varie entre 0,5 et 0,6 pour une installation correctement dimensionnée, mais peut valoir 0,2 dans certains cas.

De la formule précédente, nous pouvons déduire une conclusion importante : le rendement est plus élevé lorsque la température de condensation est basse et la température d'évaporation est élevée.

Il en résulte que seules les installations avec la même température basse peuvent être comparées.

Dans le tableau suivant sont reportées des valeurs de COP pour des systèmes de refroidissement utilisés pour refroidir des liquides. Les calculs sont le plus souvent basés sur des technologies de compresseurs à vis ou à pistons, mais ces valeurs peuvent aussi être appliquées aux compresseurs centrifuges. Afin de faciliter la comparaison, la température de condensation est maintenue constante à 40°C. Le champ « Température Entrée/Sortie » représente la température en entrée et en sortie de l'évaporateur pour le fluide à refroidir concerné.

Liquide	Température entrée/Sortie °C	Capacité thermique de refroidissement kW/m ³	COP du compresseur	COP du système	Consommation électrique	
					du compresseur kW/m ³	du système électrique kW/m ³
Eau pure	13 /7	6,98	4,79	3,88	1,46	1,8
Eau pure	11 / 5	6,98	4,51	3,65	1,55	1,9
Monoéthylène						
10 %	4 /-2	6,90	3,54	3,02	1,95	2,3
20 %	-2 /-8	6,57	2,91	2,51	2,26	2,6
30 %	-10 / -18	6,30	2,4	2,11	2,62	3,0
Monopropylène						
10 %	4 /-2	6,92	3,54	3,02	1,95	2,3
20 %	-2 /-8	6,85	3,06	2,51	2,24	2,7
30 %	-10 / -18	6,80	2,57	2,11	2,64	3,2
Chlorure de calcium CaCl ₂						
10 %	4 /-2	6,60	3,54	3,02	1,86	2,2
15 %	-2 /-8	6,31	2,91	2,51	2,17	2,5
20 %	-8 / -14	6,15	2,55	2,24	2,41	2,7
30 %	-14 / -20	5,94	2,18	1,91	2,73	3,1

Tableau 1 : valeurs indicatives de COP pour différents systèmes de refroidissement

La différence entre le COP du système et le COP du compresseur est que le COP du système inclut toute la puissance électrique nécessaire à la production de froid (i.e. compresseurs avec ventilateurs et pompes inclus), alors que le COP compresseur ne prend en compte que la consommation électrique du compresseur.

4.4 Ammoniac et autres fluides réfrigérants

La conception des machines de production de froid utilisant de l'ammoniac ou des fluides halogénés est comparable. Toutefois, la plupart des composants sont à base de métaux ordinaires tels que le cuivre, les alliages de cuivre et le zinc qui sont sensibles à la corrosion par ammoniac.

De plus, si l'on considère les caractéristiques intrinsèques de l'ammoniac et particulièrement de son incompatibilité avec les métaux cuivreux, ainsi que la part de marché qu'il représente, on constate que les équipements adaptés à l'utilisation de l'ammoniac sont très spécifiques et moins utilisés que les équipements fonctionnant à partir de fluides halogénés.

L'ammoniac, comme substance naturelle, est synthétisé en quantité importante par l'industrie chimique. Comme fluide réfrigérant, l'ammoniac présente un certain nombre d'avantages :

- bonnes propriétés thermodynamiques (transfert de chaleur/masse) permettant d'obtenir des machines avec les meilleurs coefficients de performance du

Efficacité énergétique

fr.leonardo-energy.org

marché ;

- plus haute valeur d'enthalpie de vaporisation, permettant de produire des températures égales à -60°C ;
- neutralité chimique face aux composants du système de réfrigération, sauf pour le cuivre et ses alliages, et instabilité en présence d'air humide et d'eau ;
- meilleure stabilité face à l'huile ;
- détection facilitée des fuites, même pour des fuites minimes (détection olfactive à 5°ppm, etc.) ;
- pas d'impact sur l'Ozone ou de contribution à l'effet de serre ;
- prix d'achat le moins cher de tous les réfrigérants (5 à 8 fois moins cher par kilo), mais l'installation est plus coûteuse du fait de la nécessité d'utilisation d'acier inoxydable ;
- coûts de pompage réduits pour les systèmes intégrés et diminution des sections des canalisations à puissance de refroidissement équivalente.

Les restrictions associées à l'utilisation de l'ammoniac dépendent des risques qui y sont associés, en particulier :

- gaz à caractère potentiellement inflammable,
- toxicité à basse concentration dans l'air (25 ppm),
- pressions relativement hautes nécessitant l'utilisation d'épaisseur d'acier plus importantes que celles mises en jeu pour les composés utilisés pour les réfrigérants halogénés.

4.5 Economie d'énergie réalisable sur les systèmes de refroidissement par compression

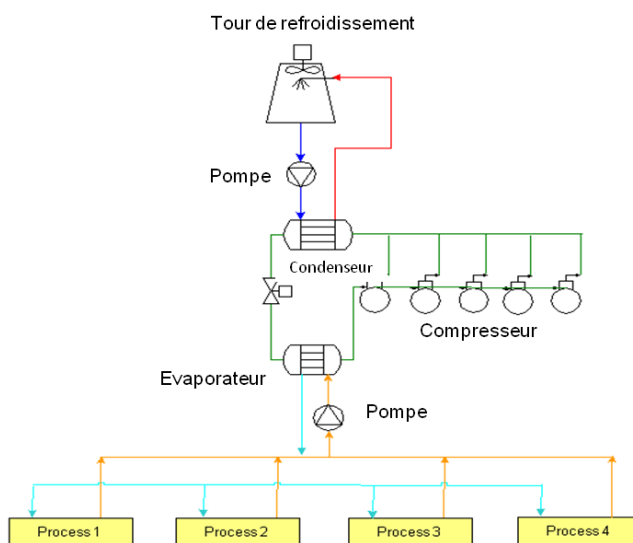


Figure 6 : exemple d'une machine de production de froid à évaporation

Le premier, et aussi le plus important facteur d'économie d'énergie, est une maintenance de qualité, à savoir, nettoyage des condenseurs, vidange des compresseurs, dégivrage des évaporateurs, etc.

D'autres facteurs peuvent être prise en compte pour réaliser des économies d'énergie :

- vérification régulière des valeurs de consigne des températures d'évaporation. Le rendement augmente lorsque la température d'évaporation est la plus élevée possible ;
- vérification régulière des valeurs de consigne des températures de condensation. Le rendement augmente lorsque la température de condensation est la plus basse possible ;
- mise en œuvre d'un variateur de vitesse sur toutes les pompes fonctionnant à flux réduit ou variable, ce qui aura pour effet une réduction substantielle des coûts énergétiques selon le type d'application. Cela s'applique aussi aux compresseurs d'une installation de production de froid ;
- les machines de production de froid de petites tailles ont souvent des rendements moins bons que les installations importantes (dus en partie à une meilleure performance de chacun des éléments). Il en résulte que le système de production de froid centralisé permet de plus hauts rendements, ce qui se traduit par des économies d'énergie comparativement à plusieurs unités séparées ;
- en hiver de très basses températures peuvent être obtenues (jusqu'à 5°C-10°C) en utilisant un système de refroidissement par évaporation. A cette période de l'année, il peut être avantageux d'utiliser des systèmes de production de froid par évaporation plutôt que par détente directe ;
- afin d'éviter ou de compenser des pics de production de froid, des techniques de stockage de froid peuvent être mises en œuvre avantageusement ;
- Les compresseurs à vis utilisent des systèmes de « glissement de capacité » qui permettent de réduire les capacités des compresseurs à hauteur de 10 % du nominal. Toutefois, l'utilisation de variateur de vitesse permet d'obtenir de meilleurs rendements en réduction de capacité, comme cela est représenté sur le graphique ci-après.

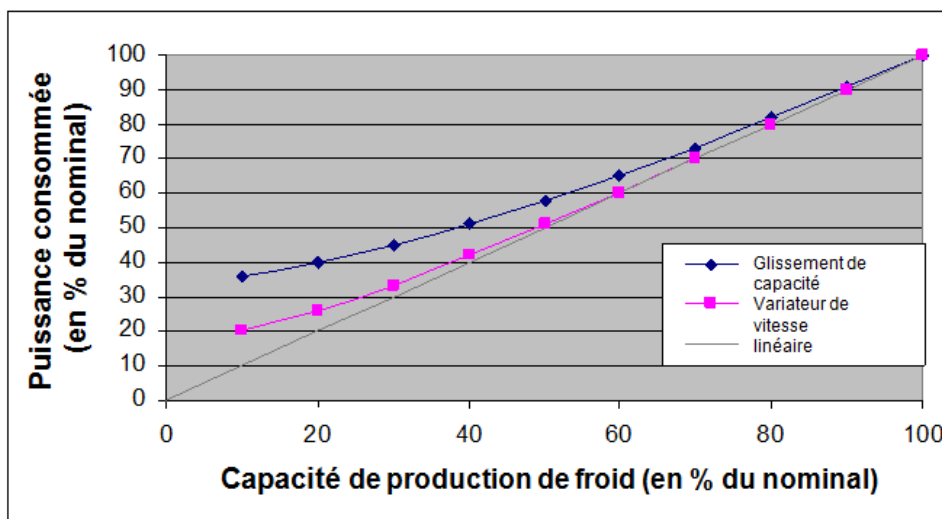


Figure 7 : impact de la capacité de production de froid sur la consommation énergétique

5. Conclusion

La production de froid est très largement utilisée dans notre société actuelle et représente 7 % des coûts de la consommation électrique en Europe Occidentale, chiffre en constante augmentation. En tant que consommateur important d'énergie, il convient d'accorder un soin tout particulier au dimensionnement et à l'utilisation des systèmes de production de froid afin d'en améliorer le rendement et d'en diminuer la consommation énergétique. Pour cela, certaines règles doivent être appliquées :

- attention portée au choix des équipements et au dimensionnement lors de la phase de conception. La solution la moins chère étant souvent aussi la moins performante.
- attention portée aux réglages des points de consigne afin de réduire la consommation énergétique tout en maintenant des capacités de refroidissement suffisantes.
- attention portée à la maintenance, poste le plus important pour garantir un fonctionnement efficace du système de production de froid.

5. Références et bibliographie

- [1] www.cti.org (Cooling Technology Institute), accessed December 2006
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., Ashrae Handbook: Refrigeration (SI Edition), Atlanta (USA), 2002
- [3] S.K. Wang, Handbook of air conditioning and refrigeration, McGraw-Hill (Second Edition), New York (USA), 2000
- [4] European Commission, Integrated Pollution and Prevention Control (IPPC), Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems, 2001