

Publication professionnelle

L'impact du sous-refroidissement des frigorigènes sur l'efficacité des installations

„Sous-refroidir, mais correctement!”

Sujets principaux:

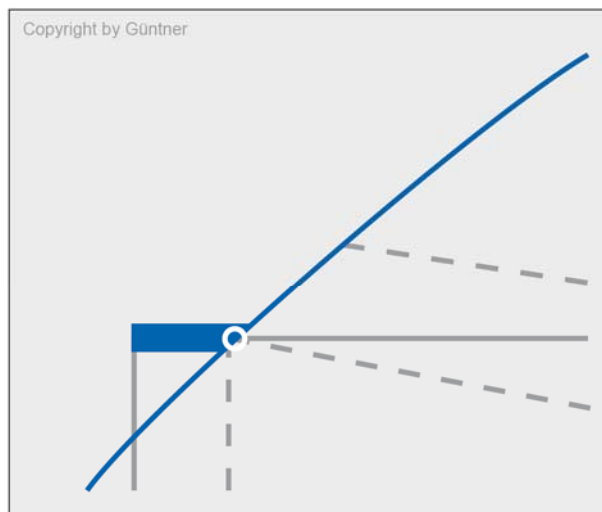
- Les principes théoriques et les différents concepts de sous-refroidissement
- Planification globale d'une installation
- L'impact du sous-refroidissement sur la conception des composants et l'interaction des composants et régulations
- L'évaluation pratique et économique des différentes possibilités
- L'avantage énergétique et par conséquent l'amélioration de l'efficacité
- Limites physiques et techniques de l'installation du sous-refroidissement

L'impact du sous-refroidissement des frigorigènes sur l'efficacité des installations

« Sous-refroidir, mais correctement ! »

Cet article se propose de résumer des articles jusqu'ici publiés sur ce sujet, afin d'obtenir une analyse aussi complète que possible. L'accent portera ici sur :

- les principes théoriques
- les différents concepts de sous-refroidissement
- la planification globale d'une installation
- l'impact du sous-refroidissement sur la conception des composants
- l'interaction des composants et régulations
- l'évaluation pratique et économique des différentes possibilités
- l'avantage énergétique et par conséquent l'amélioration de l'efficacité
- jusqu'aux limites physiques et techniques de l'installation du sous-refroidissement.



Sous-refroidissement dans le diagramme $h, \log p$ (extrait)

Fig. 1 : Sous-refroidissement dans le diagramme $h, \log p$ (extrait)

Après avoir rappelé les relations théoriques, nous décrivons l'état du frigorigène du côté haute pression d'une installation frigorifique classique et son passage à travers les différents composants du circuit. Le frigorigène passe du condenseur par le collecteur, l'organe d'expansion et l'évaporateur et aboutit dans la tubulure d'admission du compresseur.

Pour simplifier, nous examinons ici le circuit du frigorigène d'une installation frigorifique mono-étagée à compression de vapeur. Les conditions détaillées sont expliquées sur chaque exemple correspondant ou dans les présentations comparatives.

Les installations frigorifiques industrielles que cet article propose d'analyser de plus près sont normalement des pièces uniques. Cela signifie que pour parvenir au fonctionnement optimal de l'installation, les trois points suivants doivent former une symbiose :

- Compétences en planification et expériences (planification)
- Réalisation professionnelle dans la pratique (exécution)
- Opérateurs formés aux différentes techniques rencontrées sur les installations (exploitation)

Le sous-refroidissement de frigorigènes liquides dans des installations frigorifiques à compression est un MUST pour des raisons de sécurité de fonctionnement !

Comment le sous-refroidissement doit être obtenu et avec quel frigorigène le sous-refroidissement est plus ou moins judicieux sera expliqué en détail ci-après.

Les raisons de cette exigence sont bien connues des spécialistes, de sorte que nous nous limiterons ici à faire un bref résumé :

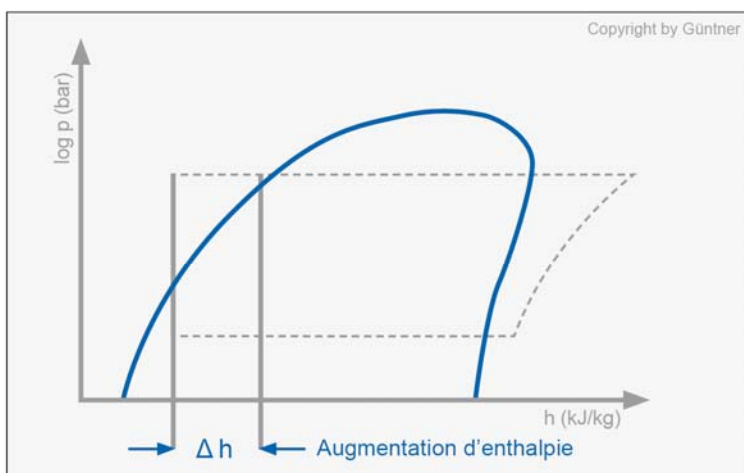
- But principal : garantir un frigorigène exempt de bulles en amont de l'organe d'expansion !
... cela doit même être garanti après avoir surmonté des pertes de charge dans la conduite des liquides dues à des raccords ou des tuyauteries et par des dénivelllements géodésiques (dans le cas d'un flux de frigorigène vertical ascendant)
- Garantir la performance de la vanne indiquée dans le catalogue (pour un détendeur généralement le plus souvent à 4 K de sous-refroidissement)
- Eviter des cavitations aux sièges de soupape
- Accroître l'enthalpie de vaporisation utile = accroissement de la performance de l'installation complète (cf. fig. 2)
- Lors de l'utilisation de l'ECI (échangeur de chaleur interne), une protection supplémentaire du compresseur est donnée dans des conditions déterminées

Dans cet article, il ne s'agit donc pas de la question du POUR ou CONTRE le sous-refroidissement, mais de QUELLE EST SON ORIGINE ? et de COMBIEN ?

Sur les pages suivantes, vous serez informé sur les possibilités réalisables dans la pratique sans générer de coûts supplémentaires importants pour chaque cas d'installation avec les conditions générales correspondantes et si cela est judicieux.

$$\Delta Q_0 = m \cdot \Delta h$$

ΔQ_0 = augmentation de la puissance frigorifique [kW], m = débit massique du frigorigène [kg/s], Δh = augmentation d'enthalpie provoquée par le sous-refroidissement [kJ/kg]



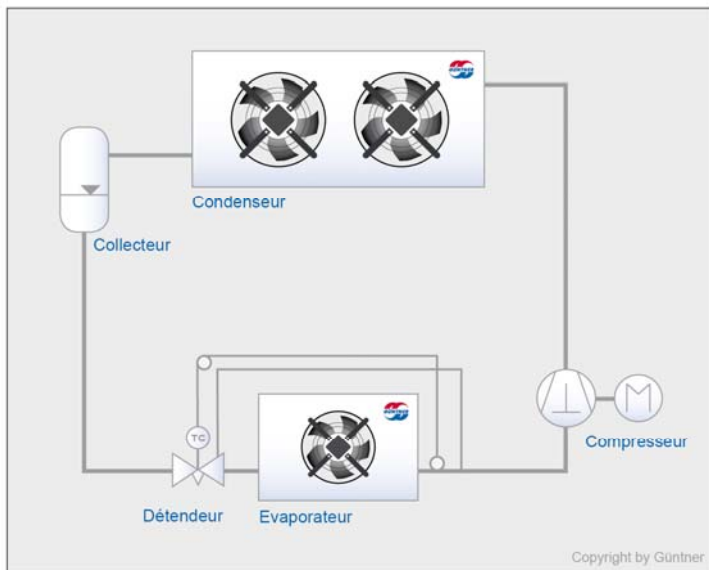
Augmentation d'enthalpie provoquée par le sous-refroidissement

Fig. 2 : Augmentation d'enthalpie provoquée par le sous-refroidissement

Cas de figure pour la création du sous-refroidissement

- Non régulé, sans échangeurs de chaleur additionnels -

1 ...dans le condenseur refroidi à l'air sans composants additionnels pour le sous-refroidissement



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air sans composant additionnel pour le sous-refroidissement

Avantages :

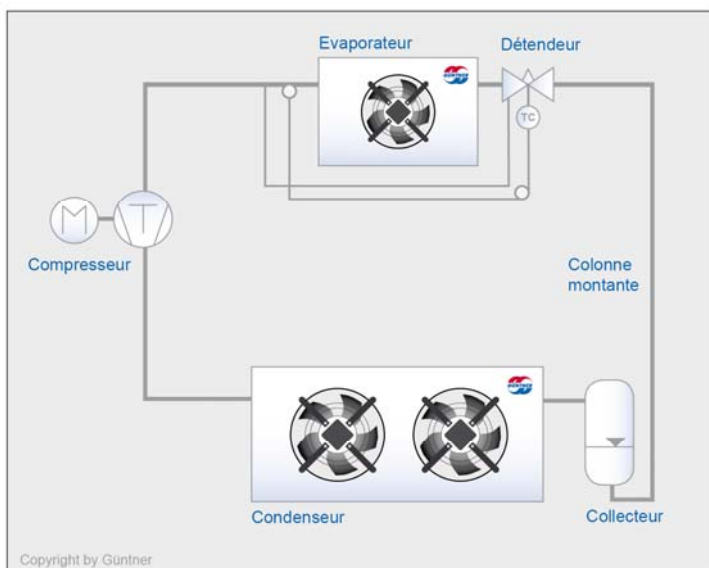
- pas de coûts supplémentaires
- pas besoin de composants additionnels

Inconvénients :

- sous-refroidissement atteignable jusqu'à 1 K avec des condenseurs à écoulement libre
- pas de régulation possible du degré de sous-refroidissement
- thermodynamiquement peu efficient, car le transfert de chaleur est mauvais avec la même configuration des tubes (faible vitesse du liquide)

Fig. 3 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air sans composant additionnel pour le sous-refroidissement

2 ...dans le condenseur refroidi à l'air par une colonne montante en aval du condenseur



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air par une colonne montante en aval du condenseur

Avantages :

- valeurs de sous-refroidissement atteignables légèrement plus grandes que dans le cas de figure 1
- pas de coûts supplémentaires
- pas besoin de composants additionnels

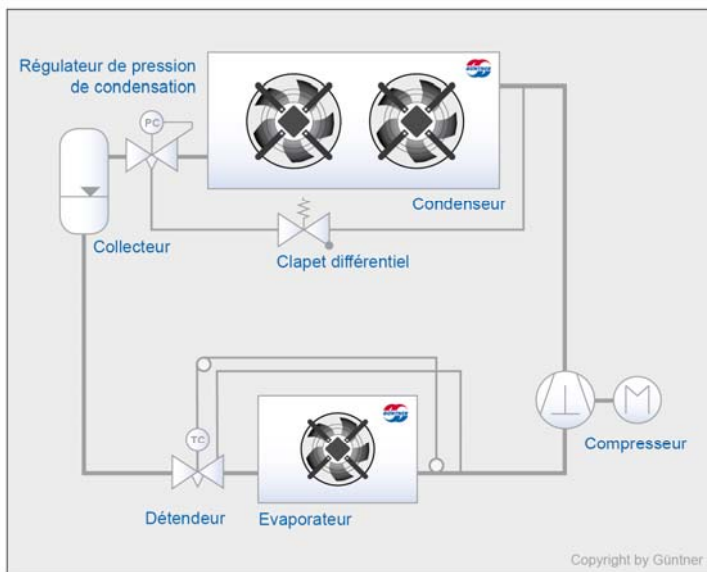
Inconvénients:

- pas de régulation possible des valeurs de sous-refroidissement
- perte de charge en fonction de la hauteur géodésique et ainsi une baisse de l'efficacité énergétique
- thermodynamiquement peu efficient, car le transfert de chaleur est mauvais avec la même configuration des tubes (faible vitesse du liquide)
- incertitude quant au degré de sous-refroidissement
- diminution de la surface utile du condenseur
- colonne montante qui conduit à des pertes de charge supplémentaires (cf. tableau 3)

Fig 4 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air par une colonne montante en aval du condenseur

3

...dans le condenseur refroidi à l'air par endiguement des frigorigènes, p.ex. avec un régulateur d'endiguement pour le réglage hiver



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air par endiguement des frigorigènes

Avantages :

- valeurs de sous-refroidissement atteignables légèrement plus grandes que dans le cas de figure 1
- pas de coûts supplémentaires
- pas besoin de composants additionnels

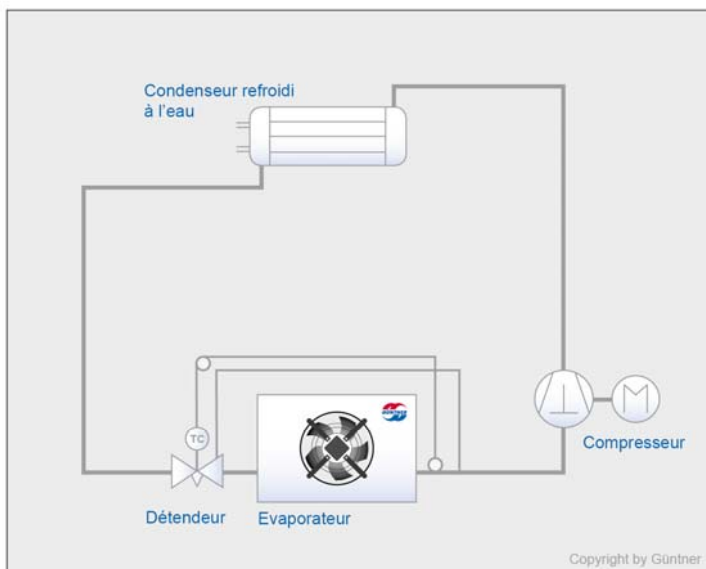
Inconvénients :

- pas de régulation possible des valeurs de sous-refroidissement
- perte de charge provoquée par les composants et ainsi une baisse de l'efficacité énergétique
- thermodynamiquement peu efficace, car le transfert de chaleur est mauvais avec la même configuration des tubes (faible vitesse du liquide)
- incertitude quant à la valeur du sous-refroidissement
- diminution de la surface utile du condenseur

Fig 5 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air par endiguement des frigorigènes

4

...dans le condenseur refroidi à l'eau



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'eau

Avantages :

- relativement sans coûts supplémentaires
- utilisation comme récupérateur de chaleur
- valeurs de sous-refroidissement relativement identiques à des températures d'eau constantes

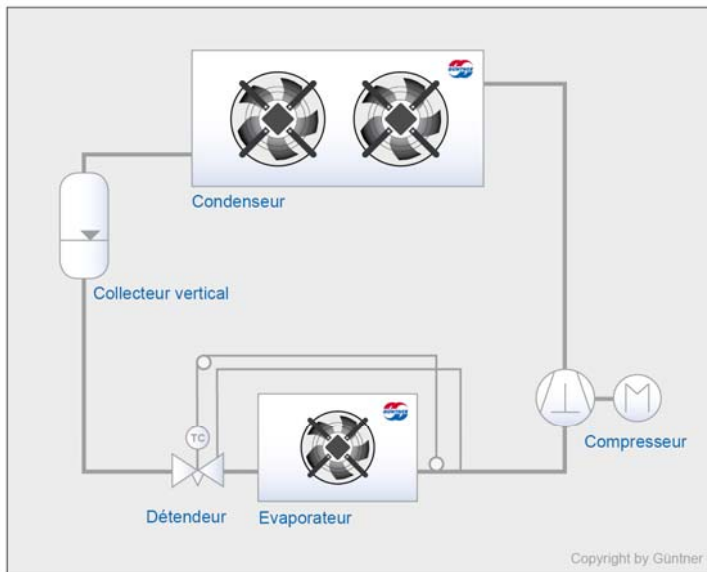
Inconvénients :

- coûts d'exploitation généralement plus élevés
- de l'eau de refroidissement d'une température appropriée doit être à disposition

Fig. 6 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'eau

5

...dans le collecteur (vertical)



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le collecteur vertical

Avantages :

- pas de coûts supplémentaires

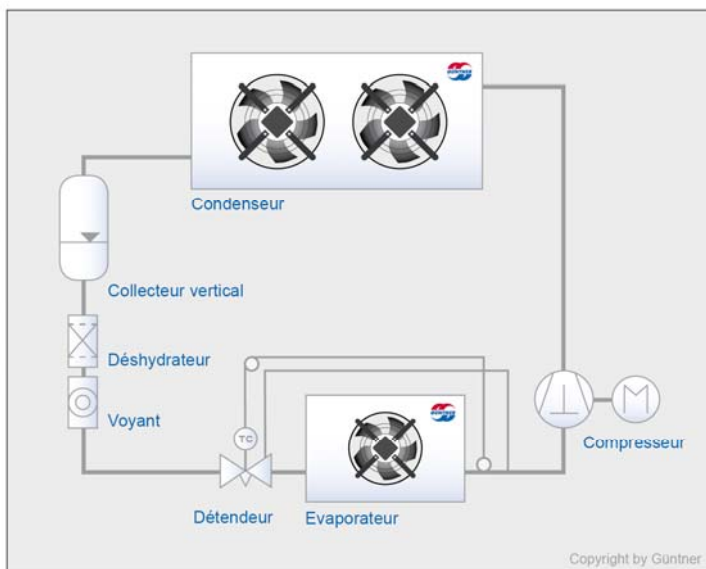
Inconvénients :

- pas de régulation possible des valeurs de sous-refroidissement
- la valeur du sous-refroidissement dépend fortement des températures ambiantes
- un sous-refroidissement avec des collecteurs verticaux peut le plus souvent être obtenu uniquement avec une alimentation plus importante en liquide (plus de frigorigènes = valeur TEWI inférieure !)

Fig. 7 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le collecteur vertical

6

...dans la conduite des liquides ou dans la robinetterie de tuyauterie



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans la conduite des liquides ou dans la robinetterie de tuyauterie

Avantages :

- pas de coûts supplémentaires
- accroissement du sous-refroidissement avec un tracé des tubes à l'horizontale et descendante ($t_{\text{frigorig.}} > t_{\text{ambiante}}$)

Inconvénients :

- pas de régulation possible des valeurs de sous-refroidissement
- un sous-refroidissement doit déjà être installé avant la première perte de charge dans la conduite des liquides. Sinon cela engendre un flash gas et éventuellement une nouvelle condensation dans la conduite !

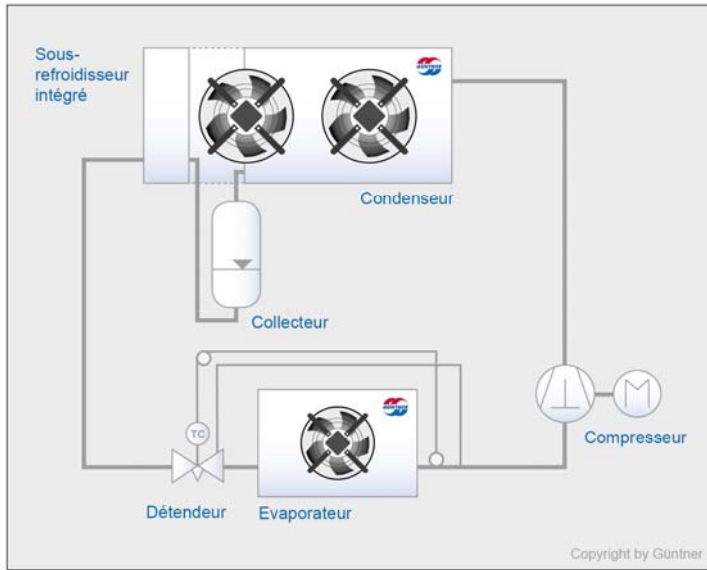
Fig. 8 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans la conduite des liquides ou dans la robinetterie de tuyauterie

- Non régulé, avec échangeur de chaleur additionnel -

7

...dans le condenseur refroidi à l'air avec registre de sous-refroidissement séparé

(Ordre des composants : condenseur->collecteur->registre de sous-refroidissement du condenseur)



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air avec registre de sous-refroidissement séparé

Avantages :

- valeurs de sous-refroidissement atteignables plus grandes que dans le cas de figure 1
- $\Delta t = t_c - t_{L1}$ p.ex. $\Delta t = 12 \text{ K} \rightarrow \Delta t_u = 10 \text{ K}$
- des valeurs de sous-refroidissement jusqu'à env. 10 K sont possibles

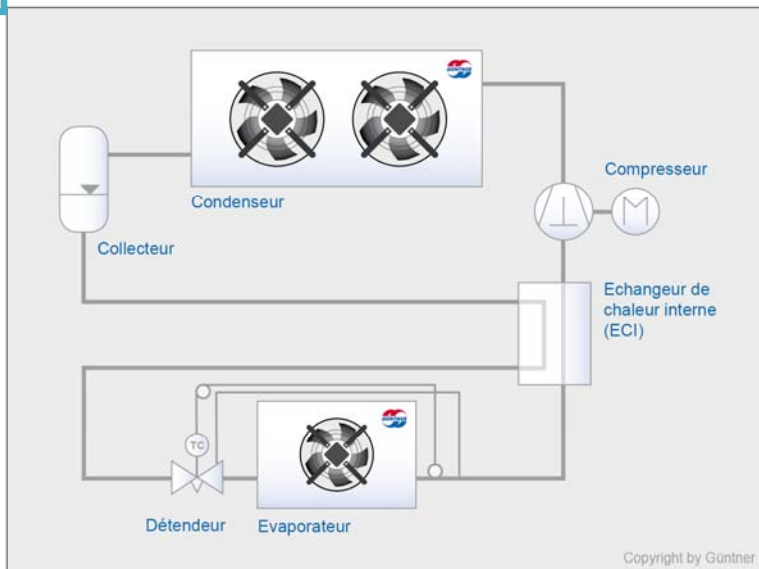
Inconvénients :

- plus de mise en œuvre pour le montage
- coûts plus élevés pour le condenseur en raison d'un deuxième circuit
- à de basses températures extérieures, un fort sous-refroidissement involontaire peut avoir lieu (en particulier avec des condenseurs horizontaux, occasionné par des phénomènes thermiques), cela peut être supprimé par un tracé de tubes à travers les pièces chaudes (possible formation de condensat - > prévoir isolation !)

Fig. 9 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur refroidi à l'air avec registre de sous-refroidissement séparé

8

... dans l'échangeur de chaleur interne ou, abrégé : ECI



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans l'échangeur de chaleur interne (ECI)

Avantages :

- l'ECI combine le sous-refroidissement du liquide frigorigène et la surchauffe supplémentaire du gaz d'aspiration
- faibles coûts supplémentaires
- protection supplémentaire du compresseur

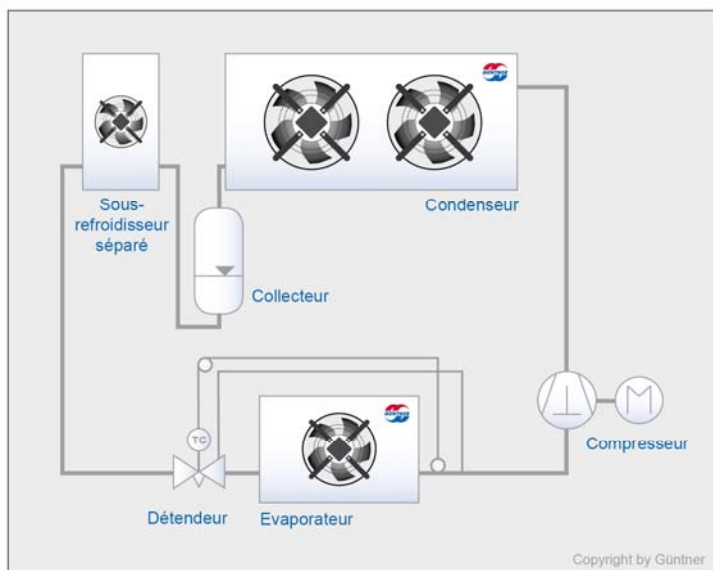
Inconvénients :

- pas de régulation possible des valeurs de sous-refroidissement
- incertitude quant aux valeurs du sous-refroidissement, mais peut être calculée pour un point de fonctionnement
- un peu plus de mise en œuvre pour le montage
- non approprié en cas de frigorigènes avec un exposant isentropique largement supérieur à 1 (p.ex. R717)
- avec ces frigorigènes il y a risque de cokéfaction de l'huile en cas de forte surchauffe
- perte de charge supplémentaire spécialement significative sur des installations frigorifiques à basse température sur le côté aspiration

Fig. 10 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans l'échangeur de chaleur interne (ECI)

9

... dans le sous-refroidisseur séparé refroidi à l'air



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le sous-refroidisseur séparé refroidi à l'air

Avantages :

- une régulation ciblée du sous-refroidissement est possible dans les limites définies
- relativement indépendant de la saison
- création de conditions de fonctionnement quasiment invariables pour les pièces dans la conduite de liquide
- des valeurs de sous-refroidissement jusqu'à env. 10 K sont possibles

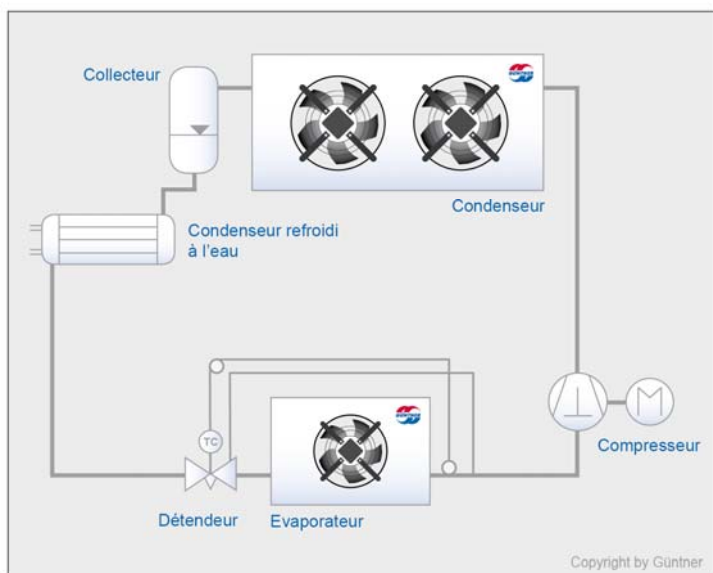
Inconvénients :

- coûts supplémentaires pour des pièces et le régulateur
- limite à env. 2 K au-dessus de la température ambiante

Fig. 11 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le sous-refroidisseur séparé refroidi à l'air

10

... dans le condenseur séparé refroidi à l'eau



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur séparé refroidi à l'eau

Avantages :

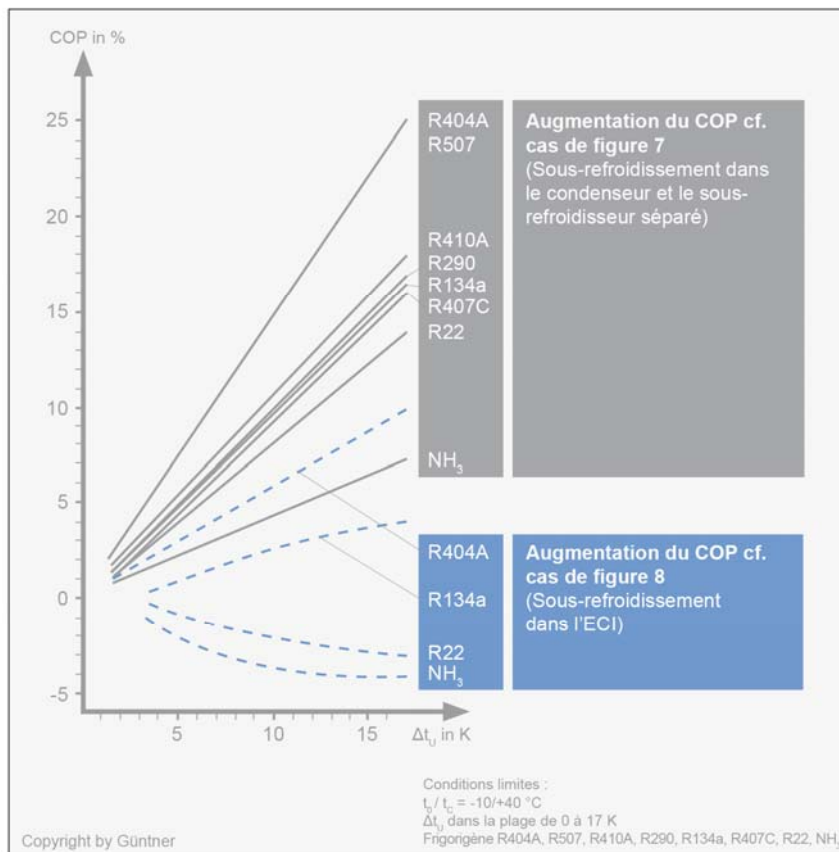
- une régulation ciblée du sous-refroidissement est possible dans les limites définies
- dépend uniquement de l'état de l'eau froide
- pratiquement pas d'impact de la température ambiante sur le sous-refroidissement
- en cas de besoin : utilisation supplémentaire comme récupérateur de chaleur

Inconvénients :

- de l'eau industrielle doit être à disposition en quantité suffisante et bien conditionnée
- échangeur de chaleur additionnel ou bien tuyauterie

Fig. 12 : Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans le condenseur séparé refroidi à l'eau

Sous-refroidissement et le choix optimal du fluide frigorigène :



Sous-refroidissement et choix optimal du frigorigène

Fig. 13 : Comparaison : impact du sous-refroidissement avec des fluides frigorigènes différents

Frigorigène	Exposant isentropique K*	Enthalpie de vaporisation R* / kJ/kg	Température en fin de compression t ₀ ** / °C	Aptitude au sous-refroidissement	
				cf. cas de fig. 7	cf. cas de fig. 8
R404A / R507	1,02	168,3	≈ 70	++	++
R134a	1,06	198,8	≈ 77	+	-
R407C	1,09	214,0	≈ 85	+	-
R410A	1,10	222,5	≈ 90	+	-
R22	1,14	202,2	≈ 100	+	-
R290 (Propane)	1,07	374,5	≈ 75	+	-
R717 (NH ₃)	1,29	1262,2	≈ 165	-	-
R723 (NH ₃ /DME)	...	913,4	≈ 140	+	-

* à t = 0 °C

Indications selon Solvay Fluor GmbH

** à t₀ / t_c / t_{oh} = -10 / +40 / +5

Compresseurs ouverts à piston
Tête de compresseur non refroidie

++ bien approprié

+ moins bien approprié

- non approprié

(cf. fig. 13)

Tableau 1 : Comparaison des fluides frigorigènes avec leurs caractéristiques thermophysiques

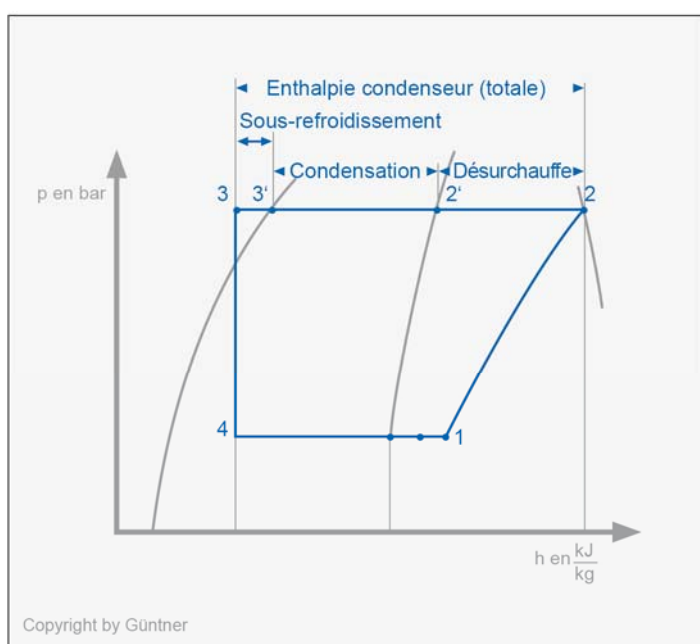
Le sous-refroidissement et le condenseur refroidi à l'air

Thèse :

« Dans des condenseurs refroidis à l'air il est possible de générer des valeurs de sous-refroidissement suffisantes. »

Cela n'est vrai que dans une certaine mesure. Dans la littérature spécialisée, les trois phases du transport d'énergie dans le condenseur sont décrites absolument correctement.

1. **Désurchauffe des vapeurs**
2. **Condensation du frigorigène**
3. **Sous-refroidissement du liquide frigorigène**



Représentation des trois phases du condenseur dans le diagramme h, log p

Fig. 14 : Représentation des trois phases du condenseur dans le diagramme h, log p

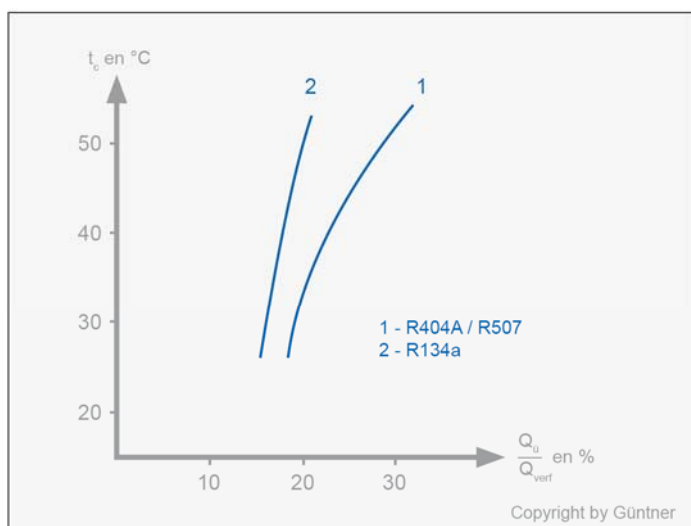
Le degré de sous-refroidissement final est toutefois relativement faible pour un condenseur à écoulement libre. Comme cela est bien connu, pour sous-refroidir le frigorigène, il doit être à l'état complètement liquide. Si le frigorigène n'est pas endigué (p.ex. régulateur de la pression de retenue etc.) à la sortie du condenseur, le degré du sous-refroidissement est très faible. Dans la pratique, l'on atteint des valeurs inférieures à env. 1 K. Un condenseur plus grand, voire éventuellement surdimensionné, ne conduit pas forcément à un sous-refroidissement plus élevé, mais réduit la pression de condensation ; c'est l'une des solutions les plus efficaces pour économiser de l'énergie, mais cela n'est pas directement lié au sous-refroidissement.

La tâche principale d'un condenseur est de condenser le fluide frigorigène. A cet effet, il est d'abord nécessaire de dissiper la surchauffe. Cette zone représente, selon la température de condensation et le type de construction, env. 5 % (R134a, $t_c=25\text{ °C}$) jusqu'à env. 15 % (R404a, $t_c=50\text{ °C}$), en cas de NH_3 même env. 20 % de la surface disponible.

La partie restante est principalement utilisée pour la condensation ; cette partie change également en fonction de la température de condensation, mais dans le sens contraire. Tout de même env. 93 % (R134a, $t_c=25\text{ °C}$) à env. 82 % (R404a, $t_c=50\text{ °C}$) sont utilisés pour la condensation.

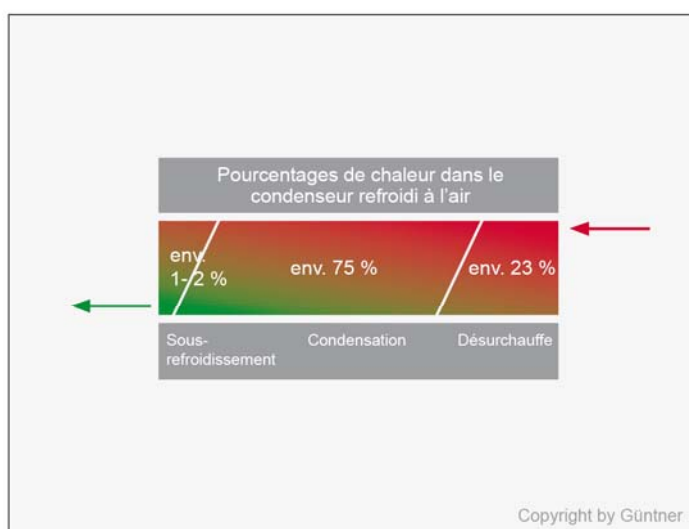
Le taux de sous-refroidissement effectif dans le condenseur est donc très faible et constitue le pourcentage restant à couvrir 100 %. A savoir, seulement env. 1,5 % (R134a, $t_c=25\text{ °C}$) jusqu'à env. 3,5 % (R404a $t_c=50\text{ °C}$). Avec du NH_3 , le pourcentage est nettement inférieur à 1 % !

Le diagramme montre la corrélation par l'exemple R404A/R507 et R134a :



Pourcentage de l'énergie de surchauffe par rapport à la chaleur de condensation

Fig. 15 : Pourcentage de l'énergie de surchauffe par rapport à la chaleur de condensation



Pourcentages de chaleur dans le condenseur refroidi à l'air (fluide frigorigène : R404A à $t_c \sim 40\text{ °C}$)

Fig. 16 : Pourcentages de chaleur dans le condenseur refroidi à l'air (fluide frigorigène : R404A à $t_c \sim 40\text{ °C}$)

Avec une conception standard pour un condenseur refroidi à l'air et un sous-refroidisseur additionnel refroidi à l'air, il est possible d'atteindre des valeurs de sous-refroidissement maximales d'env. 10 K, en partant d'une différence de température $\Delta t = t_c - t_{q1}$ de max. 12 K.

S'ajoute à cela l'aspect thermodynamique, c.-à-d. les valeurs de transmission de chaleur diminuent nettement dans la phase liquide dans le condenseur, tout en ayant le même tracé de tube. Les raisons en sont entre autres la faible vitesse d'écoulement et moins de turbulences (écoulement laminaire) que pendant la condensation. Le coefficient de transfert de chaleur est ainsi moins bon.

Le sous-refroidissement depuis le condenseur jusqu'à la sortie du collecteur de frigorigène

Thèse :

« Le sous-refroidissement qui a été créé péniblement dans le condenseur peut être complètement annulé dans le collecteur en cas de tuyauterie défavorable entre le condenseur et le collecteur ! »

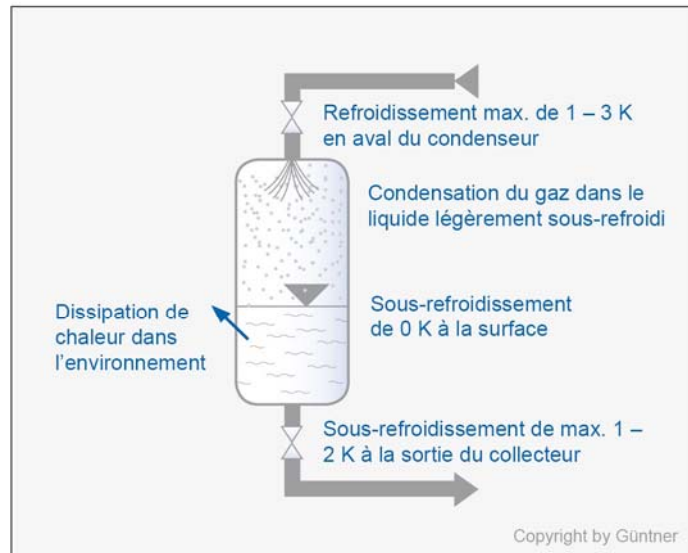
Cela est la théorie ! Si cette affirmation était vraie, alors de nombreuses installations dans la pratique travailleraient de façon très insatisfaisante, donc avec du flash-gas. Mais il est vrai qu'il n'est pas possible de sous-refroidir du fluide frigorigène dans un récipient fermé (p.ex. une bouteille de fluide frigorigène = statique), sauf si la bouteille est remplie à 100 %, ce qui ne doit être considéré ici que comme théorique.

Présumons la situation suivante : un frigorigène venant d'être sous-refroidi d'env. 1 K quitte le condenseur. Le passage dans la conduite de condensat est souvent difficile pour le frigorigène. Dû à des sections de conduite trop petites et à des modifications dans le comportement de charge de l'installation (pendant une courte durée, le collecteur reçoit plus de frigorigène que demandé par les postes de froid) le flux de frigorigène est perturbé par le gaz refluant dans le condenseur.

Dans la pratique, ce phénomène peut être observé dans des installations plus grandes à travers des voyants dans le collecteur. Le condenseur pompe le frigorigène dans le collecteur. Ce frigorigène encore légèrement sous-refroidi a maintenant atteint le collecteur. Le plus grand volume du collecteur conduit à une perte de charge minimale et le frigorigène, légèrement plus froid que le gaz contenu dans le collecteur, arrive maintenant à la surface du liquide dans le collecteur. Pendant ce passage à travers le gaz réfrigérant saturé, une petite partie condense dans le liquide légèrement sous-refroidi. Le sous-refroidissement obtenu est alors pratiquement épuisé.

Un facteur influant est le type de construction du collecteur (horizontal = grande surface de liquide, normalement pas une conception optimale), (vertical = long trajet jusqu'au liquide lors d'un fonctionnement à charge partielle, mais aussi un avantage par l'utilisation de la colonne de liquide). Cette colonne de liquide calme le fluide frigorigène et conduit à un accroissement de la pression qui se transforme quasiment en sous-refroidissement à une température constante.

A la surface, le sous-refroidissement est définitivement 0 K, c'est la physique. Etant donné que nous avons une situation dynamique durant le fonctionnement de l'installation frigorifique (tout est en mouvement), une petite partie du sous-refroidissement déjà très faible peut atteindre la zone inférieure du collecteur – dans le meilleur des cas vertical –, sans que le sous-refroidissement soit complètement épuisé. En outre, à condition que les températures ambiantes soient basses, la réserve de liquide dans le collecteur continue à être refroidie en dessous de la température de saturation, si bien que le frigorigène puisse quitter le collecteur en étant légèrement sous-refroidi. Cela peut être observé sur des grands collecteurs bien remplis : La température dans la partie inférieure du collecteur est nettement plus froide (stratification thermique). Toutefois il ne faudrait pas s'y fier, car le plus souvent les premières pertes de charge dans les conduites apparaissent déjà en aval du collecteur. Mais cela explique pourquoi de nombreuses installations fonctionnent sans problème sans sous-refroidissement séparé en aval du collecteur.



Représentation simplifiée des processus thermodynamiques dans un collecteur de frigorigène

Fig. 17 : Représentation simplifiée des processus thermodynamiques dans un collecteur de frigorigène

Pour un fonctionnement sans problème de l'installation frigorifique, l'intégration correcte du collecteur en aval du condenseur est importante.

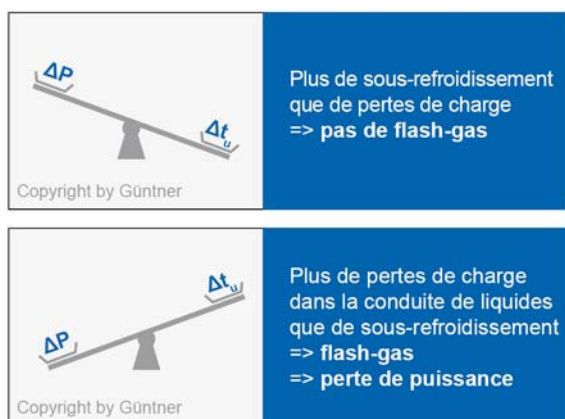
Sous-refroidissement depuis le collecteur jusqu'à l'organe d'expansion

Thèse :

« Le sous-refroidissement occasionné par la dissipation de chaleur du liquide dans l'environnement peut éliminer les pertes de charge existantes dans la conduite et empêche par conséquent la formation de flash-gas ! »

C'est jouer avec la chance ! Dans la pratique, le fonctionnement de nombreuses installations, qui disposent uniquement de cette possibilité de sous-refroidissement, se fait pour empêcher le flash-gas.

La température ambiante autour des tuyauteries de liquide est généralement inférieure à la température du liquide et influe ainsi positivement sur le sous-refroidissement du frigorigène.



Relation des pertes de charge et du sous-refroidissement entre la sortie du collecteur et le détendeur

Fig. 18 : Relation des pertes de charge et du sous-refroidissement entre la sortie du collecteur et le détendeur

Comme montré dans le schéma, sur le trajet entre le collecteur et le détendeur, le frigorigène parvient à un genre de balance entre le sous-refroidissement, donc dissipation de chaleur dans l'environnement par la conduite des liquides (voir tableau 2) et ses composants, et le franchissement des pertes de charge existantes dans la tuyauterie, les composants et du dénivellement géodésique (voir tableau 3).

Diamètre de tuyau	Longueur de tuyau			
	5 m	10 m	15 m	20 m
12 mm	0,4 K	0,8 K	1,2 K	1,5 K
16 mm	0,3 K	0,5 K	0,8 K	1,0 K
18 mm	0,2 K	0,4 K	0,7 K	0,9 K
22 mm	0,1 K	0,3 K	0,6 K	0,8 K

Tableau 2 : Sous-refroidissement du frigorigène dans la conduite horizontale des liquides lors d'une différence Δt de 20 K par rapport à l'environnement (pas de flux d'air puissant, pas d'isolation du tuyau, sans pertes de charge, tuyau Cu, vitesse d'écoulement env. 0,7 m/s) (Source : Programme de calcul Armacell)

	Longueur 10 m				
	Colonne ascendante		droit	Colonne montante	
Dénivellement	-10 m	-5 m	+/- 0 m	+5 m	+10 m
Gain (+) ou perte (-) de sous-refroidissement en K pour R404A	+1,8 K	+0,9 K	-0,1 K	-1,1 K	-2,1 K
R407C	+2,1 K	+1,0 K	-0,1 K	-1,2 K	-2,3 K
R134a	+4,3 K	+2,2 K	-0,2 K	-2,5 K	-5,2 K
R717	+1,5 K	+0,8 K	-0,2 K	-0,7 K	-1,5 K

Tableau 3 : Perte de charge dans la conduite de liquides due à un changement de hauteur pour une conduite de liquides Ø 15 mm à $Q_o = 10$ KW de puissance frigorifique (valeurs approximatives) (Source : Programme DANVEN)

Limites pour les composants de tuyauterie

Des valeurs de sous-refroidissement extrêmes combinées à la mise en marche/arrêt d'une installation ou d'un poste de froid peuvent conduire à des liquides accélérés entraînant les dommages connus. Dans ces cas, dû à l'ouverture des électrovannes (= brève perte de charge) dans la conduite des liquides, il n'y aura pas de formation de bulles de gaz frigorigène qui ralentissent le flux de liquide. Le liquide sera ainsi accéléré (non ralenti, car fortement sous-refroidi) et arrive au détendeur où il est brusquement freiné. Le liquide a donc subi une énergie cinétique qui se fait ressentir dans les conduites par des coups de bélier. Des conduites arrachées ou des déshydratateurs déchirés ont été décelés comme dommages survenus dans le passé. Des coups de bélier de plus de 75 bars (haute fréquence) ont été mesurés dans la conduite de liquide.

Sous-refroidissement et le détendeur

Thèse :

« Lorsque le degré de sous-refroidissement monte, la capacité du détendeur accroît aussi ! »

Dans des conditions limites constantes telles que charge, réglage de la surchauffe, température d'évaporation et différence de pression en amont du détendeur, l'on part du principe que le diamètre d'ouverture ou le flux massique du frigorigène traversant le détendeur sont constants. En raison du sous-refroidissement, l'enthalpie d'entrée et ainsi l'enthalpie de vaporisation totale augmentent.

Voir la formule : $\Delta Q_0 = m \times \Delta h$

Cela conduit à une puissance frigorifique de ΔQ_0 plus grande, au même diamètre d'ouverture et avec la même buse que sans sous-refroidissement.

Avec l'accroissement du sous-refroidissement, les volumes spécifiques diminuent pendant l'expansion [m³/kg]. Avec un diamètre d'ouverture inchangé du détendeur, on pourrait donc même obtenir un débit de frigorigène, m [kg/s], plus grand et par conséquent augmenter encore la puissance indiquée ci-dessus !

Sous-refroidissement en amont du détendeur	0,1 K	4 K données catalogue	10 K	15 K	20 K
Puissance frigorifique nominale	10,0 kW	10,7 kW	11,7 kW	12,5 kW	13,2 kW
Changement de performance	93 %	100 %	109 %	116 %	123 %

Tableau 4 : Changement de performance des détendeurs par l'influence du sous-refroidissement -10 °C / +40 °C (Source : Programme DANVEN)

Approximativement on peut dire que le sous-refroidissement modifie le rendement du détendeur d'env. 1 % par Kelvin changé.

Un autre point important concernant les détendeurs est l'état de sous-refroidissement insuffisant. Quelle est la conséquence ?

Comme déjà expliqué, un sous-refroidissement manquant ou trop faible en aval du collecteur (!) dû à des pertes de charge existantes dans la conduite des liquides conduit dans le pire des cas à une pré-évaporation (flash-gas). Ces bulles de gaz doivent passer par le siège de la soupape du détendeur pendant la durée de fonctionnement de l'installation frigorifique et ont un volume beaucoup plus grand que la même masse à l'état liquide. Ainsi, la quantité de frigorigènes effectivement injectée est d'abord réduite. L'élément capteur (surchauffe augmente) monté à la sortie de l'évaporateur réagit à cela. Une surchauffe plus élevée dans l'évaporateur conduit à une augmentation de pression dans l'élément capteur. Le détendeur agrandira alors le diamètre d'ouverture. Si l'état en amont du détendeur change (absence de bulles de gaz temporairement), une quantité plus grande de frigorigènes sera injectée dans l'évaporateur

(modification de la densité du liquide). Cela est également détecté par l'élément capteur et conduit à la fermeture du détendeur. La surchauffe ne peut donc plus être compensée de façon stable et le système évaporateur-détendeur oscille. Ces phénomènes sont souvent observés lors de la désactivation complète des ventilateurs du condenseur (commande étagée pressostatique).

Limites pour le détendeur

Le taux de gaz décrit, après ou pendant l'expansion, conduit à un ralentissement dans le détendeur et est voulu. Les différents fabricants de détendeurs indiquent des valeurs limites de $x > 20\%$ de taux de vapeur ($x > 0,2$).

Le diagramme ci-dessous permet de montrer la limite de sous-refroidissement existante pour le détendeur indépendamment du frigorigène utilisé.

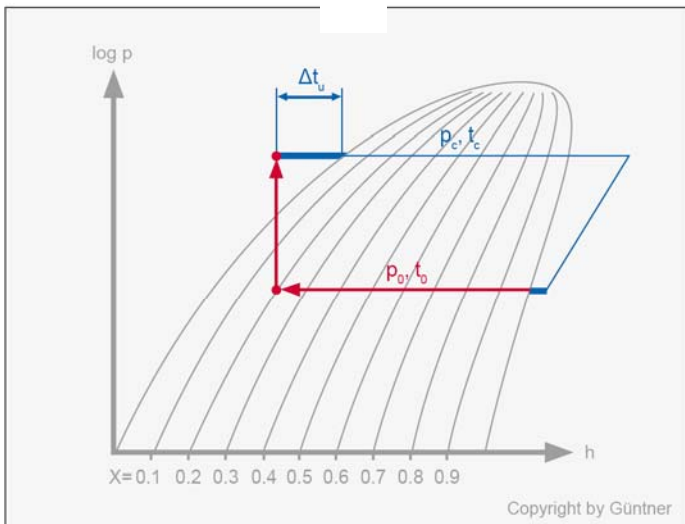


Diagramme pour déterminer le sous-refroidissement maximal possible pour le détendeur (taux de vapeur dans le détendeur à 20 %)

Fig. 19 : Diagramme pour déterminer le sous-refroidissement maximal possible pour le détendeur (taux de vapeur dans le détendeur à 20 %)

Théoriquement il est possible de générer de telles valeurs de sous-refroidissement élevées avec un sous-refroidisseur externe, de sorte que la détente dans le détendeur ne conduise pas encore à la présence de frigorigènes évaporés (encore à gauche de la courbe d'ébullition). Cette façon de procéder n'est toutefois pas recommandée. D'une part, il pourrait arriver qu'il soit nécessaire de chauffer au préalable le frigorigène détendu à la température d'évaporation avant qu'il puisse s'évaporer, et les valeurs de transfert de chaleur sont plutôt mauvaises en cas de faible pourcentage de vapeur. D'autre part, le ralentissement manquant dans le détendeur peut conduire à des dommages ultérieurs ou à une usure plus importante. En outre, la conduite de liquides doit être isolée contre l'eau de condensation.

Cavitation au siège de soupape due à un sous-refroidissement manquant au détendeur

Les bulles de gaz en amont du détendeur peuvent aussi contribuer à la détérioration du siège de soupape. Cela est appelé cavitation et a déjà été observé sur des hélices de bateaux.

Les bulles de gaz accumulées en amont du détendeur (flash-gas) vont quasiment imploser lors d'une baisse de pression – ce qui a lieu au niveau de la buse. De ce fait, de fines particules de métal seront arrachées de la surface de la buse et, par conséquent, le détendeur ne pourra plus fermer correctement lors d'un fonctionnement prolongé et le compresseur risque de transporter du frigorigène liquide en cas de petites charges partielles !

Sous-refroidissement et l'évaporateur

Comme mentionné ci-dessus, une augmentation de la performance par un accroissement du sous-refroidissement à l'évaporateur n'est pas perceptible. Au contraire ! Le transfert de chaleur du frigorigène dans l'évaporateur est relativement mauvais en cas de faibles taux de vapeur en aval de l'expansion et sans mesures spéciales. Cet effet est généré par les turbulences manquantes dans le frigorigène. Celles-ci accroissent de nouveau avec l'augmentation du taux de gaz et ainsi la transmission de chaleur s'accroît aussi.

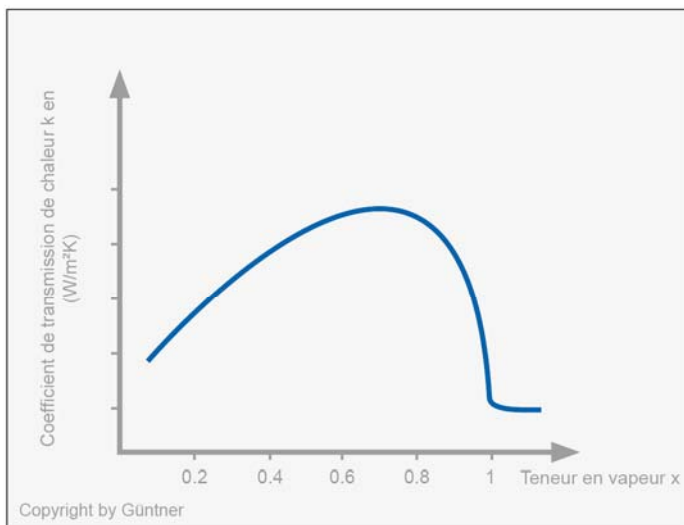


Schéma de l'évolution des coefficients de transfert de chaleur en fonction de la teneur en vapeur du frigorigène

Fig. 20 : Schéma de l'évolution des coefficients de transfert de chaleur en fonction de la teneur en vapeur du frigorigène

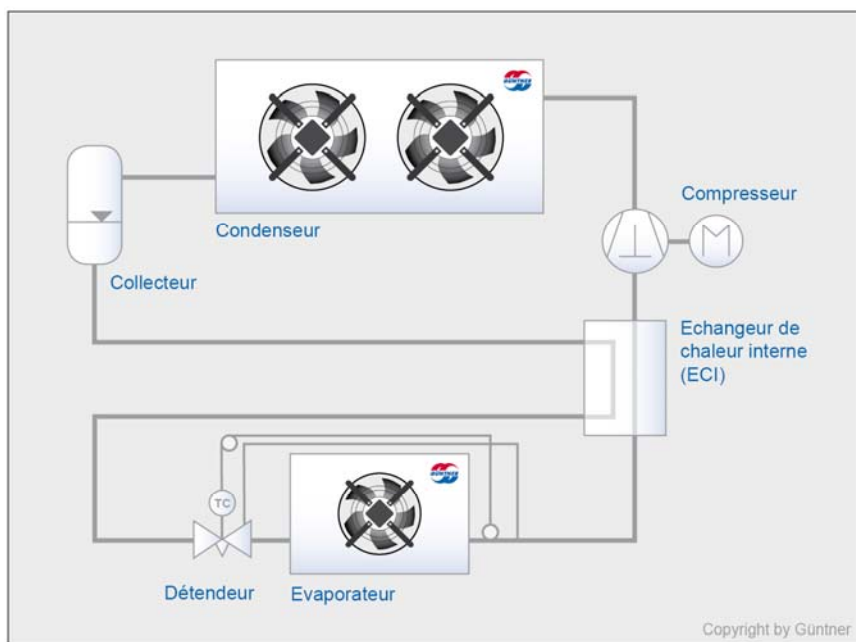
Le diagramme montre qu'avec l'accroissement de la teneur en vapeur lors de l'évaporation, le coefficient de transmission de chaleur accroît aussi.

Sous-refroidissement dans l'échangeur de chaleur liquide-vapeur, en abrégé ECI

Une utilisation effective d'un ECI est fortement liée au fluide frigorigène employé. Les frigorigènes d'un exposant isentropique près de 1 sont idéaux pour l'emploi (cf. figure 10).

Dans le tableau on peut voir p.ex. que les frigorigènes R404a/R507 ont un exposant isentropique très petit et le R717 (ammoniaque) a un exposant isentropique nettement supérieur.

En utilisant un ECI, plusieurs effets positifs seront combinés. Le liquide doit être sous-refroidi - avant de devoir surmonter les pertes de charge. L'emplacement optimal pour intégrer un ECI dans le circuit est donc la position directement en aval du collecteur de frigorigène. Dans le contre-courant (principe à tuyau double), le gaz d'aspiration absorbe la chaleur du frigorigène liquide et est en outre surchauffé. Voir le schéma :



Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans l'échangeur de chaleur interne (ECI)

Fig. 10: Cas de figure pour créer le sous-refroidissement dans l'échangeur de chaleur interne

Vu de manière simplifiée, cette surchauffe supplémentaire a un bon et un mauvais côté.

Le **côté positif** est de pouvoir protéger le compresseur contre du frigorigène non évaporé. Ces gouttes de liquides peuvent parvenir au compresseur par :

- des injecteurs qui ne fonctionnent pas de façon optimale,
- des variations de charge brusques,
- un mauvais emplacement des capteurs (également des capteurs desserrés),
- le soi-disant « hunting » en cas de charge partielle des détendeurs,
- des commutations du fonctionnement après dégivrage par gaz

...etc.

Ce frigorigène non évaporé s'évaporerait au plus tard dans le canal d'aspiration, dans le carter du compresseur, au bobinage (compresseur refroidi au gaz d'aspiration) ou dans la chambre d'aspiration.

En revanche, cela conduirait à des pertes de puissance, à une trop forte contrainte thermique des bobinages, à une augmentation du moussage de l'huile lors de la mise en marche, à la dilution de l'huile et ainsi à des charges supplémentaires pour le compresseur jusqu'aux chocs hydrauliques.

Le **côté négatif** est qu'un tel ECI représente en tout cas une perte de charge supplémentaire (différemment forte selon le type de construction de l'ECI). Cela est énergétiquement désavantageux – en particulier en cas d'application à basse température. La surchauffe supplémentaire non régulée conduit à une augmentation du volume – bien que minime – du gaz d'aspiration, ce qui amène des coefficients de performance légèrement plus faibles, tout en ayant la même cylindrée et le même régime. Ces prétendus inconvénients peuvent être considérés comme secondaires par rapport aux avantages, de sorte à créer un réel bénéfice. L'efficacité dépend fortement du frigorigène choisi. De façon approximative on peut partir d'un rapport de 1:2 (en K) pour un sous-refroidissement supplémentaire (valeur 1) et une surchauffe supplémentaire (valeur 2) en aval de l'ECI.



Exemple pour le transport de chaleur sur un ECI ;
1 K de sous-refroidissement approximativement correspond à env. 2 K de surchauffe

Fig. 21 : Exemple pour le transport de chaleur sur un ECI ; 1 K de sous-refroidissement approximativement correspond à env. 2 K de surchauffe

L'utilisation d'un échangeur de chaleur à plaques est également possible pour cela, mais il est nécessaire d'apporter un grand soin lors du dimensionnement. Dans le secteur du froid dans les supermarchés on rencontre parfois des emplacements à proximité du poste de froid. Le but est de réduire l'introduction improductive dans la conduite d'aspiration (isolée), outre le sous-refroidissement volontaire et par conséquent l'augmentation de la puissance. La conduite d'aspiration ainsi plus chaude absorbera alors moins d'énergie de l'environnement. Pour toutes les applications, les limites de surchauffe respectives indiquées par les fabricants de compresseurs (température à la tubulure d'admission) sont applicables !

Résumé

Un sous-refroidissement du frigorigène est, d'une part, nécessaire techniquement pour garantir le fonctionnement sûr de l'installation. D'autre part, un sous-refroidissement conduit dans une certaine mesure à l'amélioration du rendement total de la machine frigorifique.

Un sous-refroidissement essentiel peut être obtenu de différentes façons. Généralement, un sous-refroidissement du frigorigène est uniquement durable s'il est réalisé en aval du collecteur.

L'accroissement maximal de l'efficacité énergétique peut être atteint avec le sous-refroidissement de frigorigène en utilisant les frigorigènes R404A et R507A, comme démontre la figure 13.

Outre l'augmentation de l'efficacité énergétique, le sous-refroidissement du frigorigène est une condition préalable indispensable pour un fonctionnement sûr de l'installation. Des raccords de tuyauterie, filtres, voyants, appareils de régulation et des évaporateurs situés plus en amont occasionnent des pertes de charge qui peuvent conduire au flash-gas.

Généralement, des sous-refroidissements du frigorigène apparaissent dans les conduites de liquide, car la température ambiante est plus basse. La pose de la conduite de liquide peut nettement augmenter l'effet de sous-refroidissement (tracé des tubes ascendant et horizontal), mais aussi le réduire par des colonnes montantes. Le tracé de la conduite du liquide joue un rôle important durant la planification.

Lors d'une exécution avec un sous-refroidisseur intégré dans le condenseur, il n'est pas possible de réguler le degré de refroidissement du frigorigène dans le condenseur. Par conséquent, la conception d'une installation avec un sous-refroidisseur séparé en aval du collecteur est préférable. Le ventilateur dans le sous-refroidisseur séparé peut être réglé en continu, sans problème. Avec la nouvelle série de condenseurs GVX, basés sur la technologie d'échangeurs de chaleur à micro-canaux et développés par la société Guntner AG & Co KG, les condenseurs peuvent être livrés avec des sous-refroidisseurs séparés – y compris le système de régulation correspondant.

Pour plus de renseignements concernant la nouvelle série de condenseurs GVX, veuillez consulter notre brochure d'information.