

CONNAISSANCES DE BASE

THERMODYNAMIQUE DU CYCLE FRIGORIFIQUE

Assemblage et fonctionnement d'une installation frigorifique

Dans le cas d'une installation frigorifique à compression, l'agent réfrigérant traverse un cycle fermé et prévoit les quatre étapes suivantes:

- évaporation **A**
- compression **B**
- condensation **C**
- détente **D**

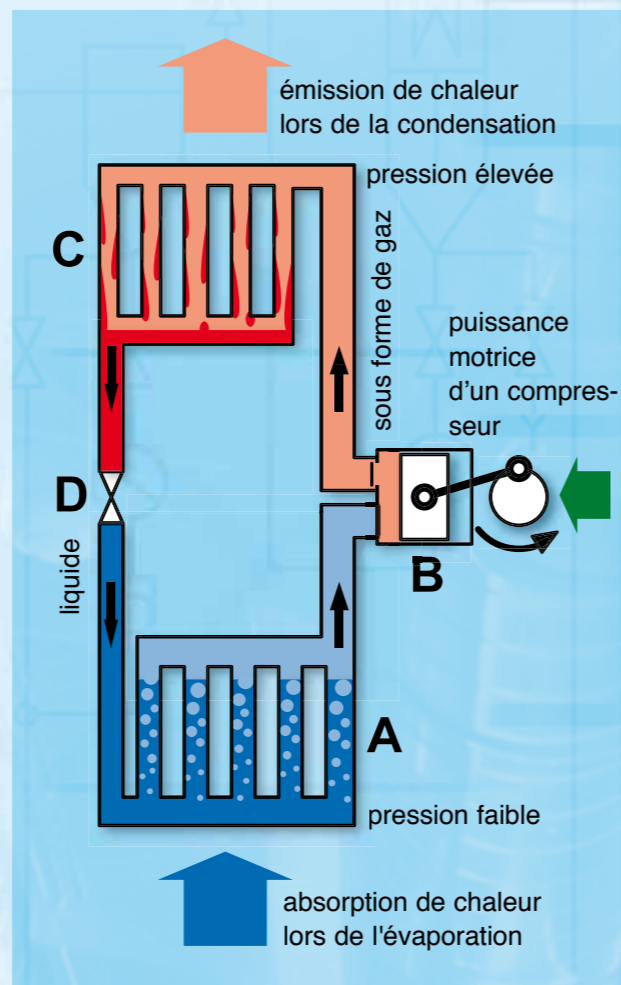
La production du froid a lieu dans l'évaporateur (**A**). L'évaporation a lieu à des pressions et à des températures faibles. Ici l'agent réfrigérant absorbe de la chaleur de l'environnement et le refroidit de cette manière.

La vapeur de l'agent réfrigérant qui est encore froide est aspirée par un compresseur (**B**) et en déployant de l'énergie mécanique, elle est portée à une pression supérieure. Par la compression, la vapeur de l'agent réfrigérant se réchauffe.

La vapeur chaude de l'agent réfrigérant est refroidie dans un condenseur (**C**) et est condensée en émettant de la chaleur dans l'environnement.

L'agent réfrigérant liquide, qui se trouve sous pression est ensuite de nouveau détendu dans un élément d'expansion (**D**) à la pression d'évaporation plus faible et est acheminé vers l'évaporateur.

L'agent réfrigérant s'évapore de nouveau et ainsi le circuit est bouclé.



Le cycle d'une installation frigorifique à compression simple

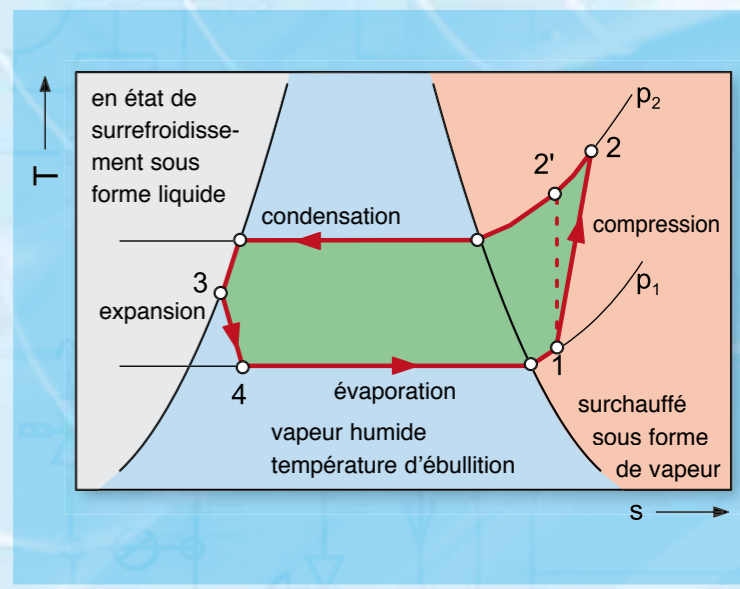
Le cycle frigorifique

Dans le cas de fluides de travail qui comme l'eau ou des agents réfrigérants peuvent survenir dans des phases différentes, le diagramme T,s se présente différemment.

Sur la gauche, il est doté d'une zone (gris) dans laquelle le fluide de travail est dans un état liquide et dans un état de surrefroidissement. Au centre (bleu) se trouve un mélange composé de vapeur et de liquide, la vapeur humide. A droite (orange) le fluide de travail est purement à l'état de vapeur et est surchauffé.

Ce diagramme T,s permet également de faire une représentation du cycle frigorifique réel et de ses passages de phases typiques. Le processus ressemble fortement au processus de force motrice de la vapeur connu. La plus grande différence consiste en ce que le processus se déroule dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Ainsi les opérations d'évaporation et de condensation ainsi que d'expansion (détente) et de compression (pompes) permutent leurs positions.

La surface enfermée (verte) correspond au travail du compresseur, celui-ci étant acheminé au processus.



Le cycle frigorifique dans le diagramme T,s

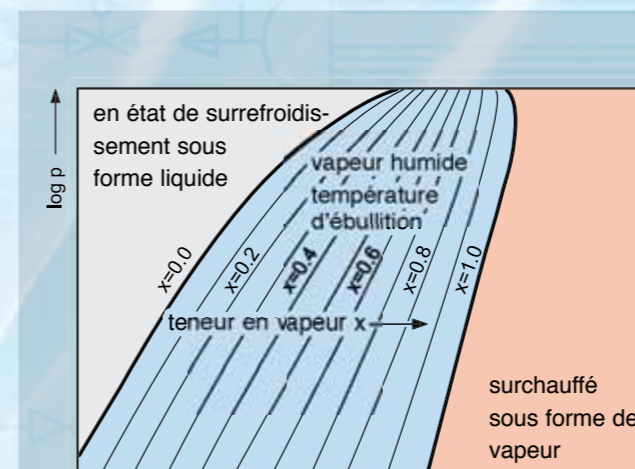


Diagramme $\log p,h$ pour agents réfrigérants

Le diagramme $\log p,h$ pour agents réfrigérants

Dans le diagramme $\log p,h$, la pression p est portée au-dessus de l'enthalpie h .

Dans la partie centrale (bleu) se trouve la zone de vapeur humide. Ici la température correspond à la température d'ébullition correspondant à la pression. La zone de vapeur humide est entourée de courbes limites, assorties d'une teneur en vapeur de $x=0,0$ et de $x=1,0$.

A gauche (gris), l'agent réfrigérant est liquide. La température se situe en-dessous de la température d'ébullition correspondant à la pression, l'agent réfrigérant étant en état de surrefroidissement.

A droite (orange), l'agent réfrigérant est dans un état gazeux et la température est supérieure à la température d'ébullition. L'agent réfrigérant est surchauffé.

Chaque agent réfrigérant a son propre diagramme $\log p,h$.

Le diagramme $\log p,h$ se prête mieux à la représentation du cycle frigorifique que le diagramme T,s et c'est la raison pour laquelle il est plus fréquemment utilisé.

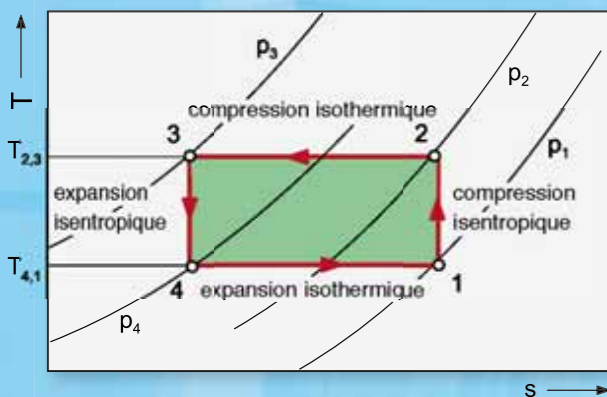
Comme les énergies échangées avec l'agent réfrigérant modifient l'enthalpie h de l'agent réfrigérant, les flux d'énergie peuvent être immédiatement interprétés dans le diagramme comme des trajets horizontaux.

Le cycle idéal

Il est possible de faire une représentation particulièrement claire du cycle dans le diagramme T,s . Ici la température T du fluide de travail est portée au-dessus de l'entropie s . La surface entourée par les changements d'état du fluide de travail correspond au travail déployé dans le cycle.

Le cycle doté du plus haut rendement possible, c'est cycle de Carnot; ici la surface entourée forme un rectangle. Ce processus est volontiers pris comme processus de comparaison afin de décrire la qualité d'un cycle.

Le sens de circulation du cycle dans le diagramme T,s décide s'il s'agit un processus de pompe à chaleur (cycle frigorifique) ou d'un processus de machine motrice (processus de la force motrice de la vapeur). Les cycles frigorifiques se déroulent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et le travail représenté par la surface verte est acheminé vers le processus.



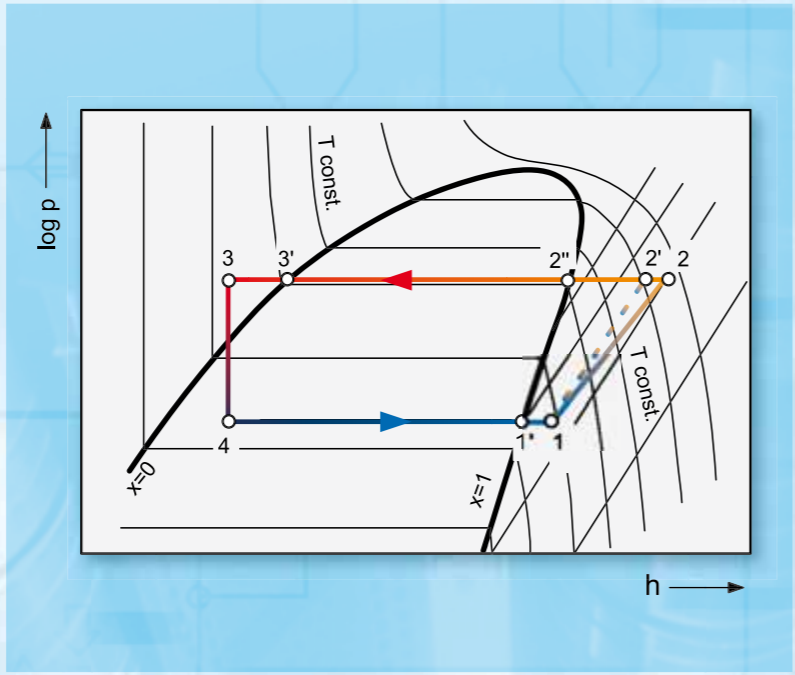
Le cycle idéal (cycle de Carnot) d'un fluide de forme gazeuse dans le diagramme T,s

CONNAISSANCES DE BASE
THERMODYNAMIQUE DU CYCLE FRIGORIFIQUE

Le cycle frigorifique dans le diagramme log p,h

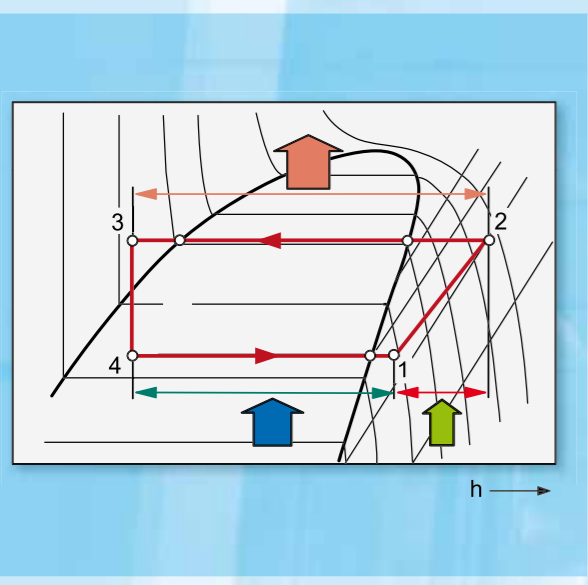
Le cycle frigorifique réel se compose des changements d'état suivants:

- 1 – 2 compression polytropique sur la pression de condensation (pour comparaison 1 – 2' compression isentropique)
- 2 – 2'' refroidissement isobarique, le refroidissement de la vapeur surchauffée
- 2'' – 3' condensation isobarique
- 3' – 3 refroidissement isobarique, surrefroidissement du liquide
- 3 – 4 expansion isenthalpique sur la pression de l'évaporation
- 4 – 1' évaporation isobarique
- 1' – 1 réchauffement isobarique, surchauffe de la vapeur



Le cycle frigorifique dans le diagramme log p,h

Dans le cadre du cycle frigorifique réel surviennent en outre également des pertes de pression, de telle sorte que l'évaporation et la condensation ne se déroulent pas d'une manière exactement horizontale (manière isobarique).



Les flux d'énergie dans le cycle frigorifique

- █ puissance frigorifique absorbée
- █ puissance motrice du compresseur
- █ puissance thermique émise

Considérations énergétiques dans le diagramme log p,h

Les écarts horizontaux des principaux points du processus dans le diagramme log p,h correspondent aux différences d'enthalpie. Dans le cas d'un cycle frigorifique simple sans jonctions des débits massiques, ceux-ci donnent multipliés par le débit massique de l'agent réfrigérant les flux d'énergie ou les puissances du système idéal. Les écarts dans le diagramme log p,h représentent donc une mesure directe pour les flux d'énergie échangés.

Le trajet 4 – 1 correspond à la puissance frigorifique et constitue la puissance utile de l'installation frigorifique. Le trajet 1 – 2 est la puissance motrice exercée par le compresseur. Le trajet 2 – 3 correspond à la puissance thermique émise par le condenseur. C'est la chaleur perdue de l'installation frigorifique.

A partir du rapport de la puissance utile et de la puissance motrice, il est possible de déterminer le coefficient de performance COP (Coefficient of Performance).

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Le coefficient de performance est comparable au rendement d'une machine motrice.

L'agent réfrigérant

Chaque cycle requiert un fluide de travail; dans le cas du cycle frigorifique, celui-ci consiste dans l'agent réfrigérant. Dans le cadre du cycle frigorifique, le rôle de l'agent réfrigérant consiste à transporter la chaleur. Ici on profite de la forte absorption d'énergie lors de l'évaporation respectivement de l'émission d'énergie lors de la condensation d'un liquide. Pour pouvoir réaliser ces opérations avec les températures habituelles régnant dans une installation frigorifique, les pressions étant maîtrisables, on utilise comme fluides de travail des liquides à ébullition légère, comme différents hydrocarbures fluorés (HF), de l'ammoniaque (NH₃), du dioxyde de carbone (CO₂) ou des hydrocarbures, comme le butane ou le propane.

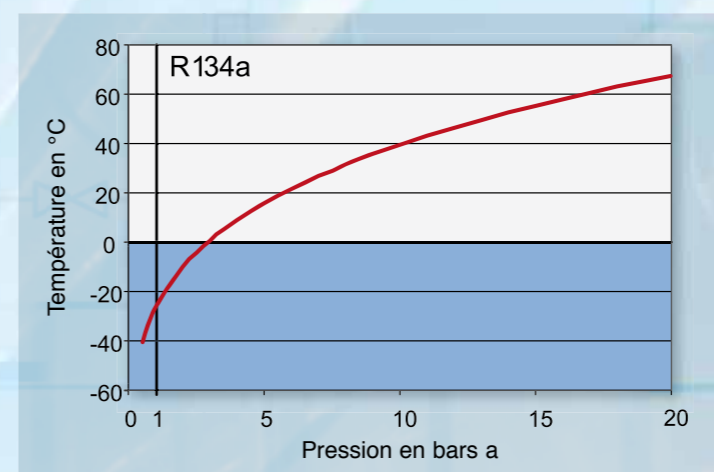
Appellation		Température d'ébullition
HF R134a	Substance extra pure	Ts = -26°C
HF R404a	Mélange	Ts = -47°C
HF R407a	Mélange	Ts = -39...-45°C
NH ₃ R717	Substance extra pure	Ts = -33°C
Isobutane R600a	Substance extra pure	Ts = -12°C
CO ₂ R744	Substance extra pure	Ts = -78°C

Les différents agents réfrigérants sont marqués avec un R et un chiffre qui le suit.

L'eau qui est souvent utilisée dans le cadre de cycles techniques ne se prête pas bien à des cycles frigorifiques. Pour les températures basses qui sont habituelles dans une installation frigorifique, la pression d'évaporation est très faible, et il existe le risque que l'eau gèle.

L'utilisation de CO₂ représente un défi technique. Ici on obtient en raison de sa température d'ébullition basse une pression très élevée. Cela a pour conséquence que les composants courants provenant du génie frigorifique, comme les soupapes, les compresseurs ou les échangeurs de chaleur ne peuvent pas être utilisés.

Egalement pour NH₃ il existe des composants spéciaux, puisque des matériaux contenant du cuivre ne résistent pas à l'ammoniaque.



Courbe de la pression de la vapeur d'HF R134a

L'évolution de la pression de la vapeur du fluide de travail est la condition pour un bon fonctionnement. Dans le cas de pressions faibles et de températures de refroidissement souhaitées, elle doit prendre une forme gazeuse et dans le cas de pressions et de températures élevées, elle doit prendre une forme liquide. Les pressions doivent par ailleurs être techniquement maîtrisables.

Le diagramme montre la courbe de la pression de la vapeur de l'HF R134a, celui-ci se prêtant bien à ce type d'opération. Il est possible d'obtenir des températures de refroidissement courantes de -26°C dans l'évaporateur avec des pressions se situant autour de 1 bar alors que la condensation n'exige qu'une pression de 17 bars à 60°C.

Alors que dans le cas de substances extra pures comme le NH₃, le propane et le CO₂, la courbe de la pression de la vapeur est figée, celle-ci peut être adaptée dans de grandes proportions aux besoins dans le cas des hydrocarbures fluorés en mélangeant différentes variétés de base.