

La réfrigération

# LE FROID DANS L'INDUSTRIE : THÉORIE DU FROID, LES RÉFRIGÉRANTS ET LES DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATIONS



Wallonie



Service public  
de Wallonie



économisons  
l'énergie



## LE FROID DANS TOUS SES ÉTATS

### Le froid, une histoire qui ne date pas d'hier

L'emploi de la glace naturelle pour la préparation de sorbets glacés était déjà connu dans l'Antiquité.

Pour refroidir les boissons des banquets qu'il donnait, César utilisait le premier procédé de fusion de la glace naturelle: des récipients étaient remplis de «neige naturelle» des glaciers et des montagnes et de la glace des étangs.

Au Moyen Age, la glace naturelle récoltée sur les étangs était conservée dans les caves installées généralement à proximité des châteaux.

Toutefois, ce n'est qu'en 1660 que la glace naturelle en mélange avec des sels fut employée pour la première fois industriellement par un limonadier parisien. Et en 1685, les savants chimistes et physiciens étudiaient déjà sans désespérer les «fluides frigorigènes» qui à leurs yeux étaient les «agents» les plus appropriés dans la mise au point et la fabrication des machines frigorifiques.

Au début du 19ème siècle, certains particuliers commencèrent un commerce de glace naturelle dans les centres urbains. Les marchands de glace naturelle de Bruxelles possédant des dépôts créèrent une société «les Glacières de St Gilles» et firent construire d'énormes caves destinées à recevoir la glace récoltée l'hiver aux étangs environnant Bruxelles. La capacité des caves était de 9000 m<sup>3</sup>, chiffre énorme pour l'époque et qui montre bien que les besoins de froid étaient déjà considérables à une époque où Bruxelles ne comptait que 100 000 habitants.

L'année 1856 voit se développer le premier système de réfrigération (pour bière) par James Harrison. Le premier frigo électrique voit le jour en 1913, et dès 1927, commercialise en masse les frigos.

Les premiers systèmes de réfrigération utilisaient l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le chlorure de méthyle (CHCl<sub>3</sub>). Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) était plus rarement utilisé car cette substance demande de hautes pressions.

En 1932, la Frick Company introduit le système «Split Stage» : pré-refroidissement par une petite unité à l'ammoniac (toxique et malodorant) et refroidissement final par une plus grande installation au CO<sub>2</sub> à une pression moindre qu'une installation uniquement au CO<sub>2</sub>.

Le dichlorodifluorométhane est introduit en 1931, et remplace rapidement le CO<sub>2</sub> et l'ammoniac car la technologie est plus simple (faible toxicité, produit peu agressif, faible pression nécessaire). Des nouveaux produits synthétiques, les CFC, sont introduits entre 1950 et 1970.

En 1987, le Protocole de Montréal enclenche le processus qui amène à la diminution et la fin de la production de CFC et d'HCFC, étant donné que ceux-ci détruisent la couche d'ozone. Les HFC/PFC qui les ont remplacés n'ont pas cet inconvénient, mais sont par contre des gaz à effet de serre à haut PRD (Pouvoir de Réchauffement Global).

Dans les pays industrialisés, 1 emploi sur 1 000 est dans le secteur des équipements frigorifiques.

Les « anciens » fluides frigorigènes qui avaient été délaissés avec l'introduction des réfrigérants chlorofluorés, font leur grand « come back ». Avec les technologies modernes, ceux-ci sont aujourd'hui plus avantageux qu'à l'époque. Ainsi, dans un contexte environnemental propice, l'ammoniac est revenu en force, et à partir de 1994, le CO<sub>2</sub> a démarré une seconde vie comme fluide frigorigène plus d'un demi-siècle après son abandon.

On retrouve également des technologies qui avaient été délaissées : les premiers éjecteurs des systèmes de réfrigération datent du début du XX<sup>ème</sup> siècle et furent utilisés sur des machines à vapeur d'eau qui disparurent avec l'arrivée des CFC.

Un éjecteur est un procédé mixte qui consiste à augmenter artificiellement la pression d'aspiration du compresseur à un niveau supérieur à la pression dans l'évaporateur grâce à un convergent-divergent (peut-être expliquer ce que c'est en 2 mots ou remplacer par un terme plus général ?).



Ancienne glacière d'entreposage de la glace naturelle. Source : [www.cmacao.net](http://www.cmacao.net)

Maintenance sur équipements domestiques anciens Source : [ameshistoricalsociety](http://ameshistoricalsociety)





Source : Copeland

## Réfrigérer, refroidir, rafraîchir ...

Un système de réfrigération est défini comme un système fournissant de la chaleur à une température inférieure à 0°C. Néanmoins, les systèmes de refroidissement forcé, fonctionnant entre 0°C et la température ambiante, sont très courants et sont basés sur les mêmes technologies de dissipation de la chaleur, grâce à un gradient de température, que celles qui sont utilisées pour la réfrigération. Pour la simplicité, sauf pour des cas particuliers on utilisera d'une façon générale le terme « réfrigération » dans la suite de ce document.

Les systèmes réfrigérants sont largement utilisés dans les applications industrielles de nos jours. Les secteurs les plus largement équipés de systèmes réfrigérants sont l'industrie agro-alimentaire, le secteur logistique (stockage et distribution) et l'industrie chimique, pétrochimique et pharmaceutique.

Le domaine industriel à proprement parler du marché de la réfrigération, est caractérisé par des puissances thermiques de 10 kW à 10 MW avec des températures d'évaporation de -50°C à +20°C. Il y a un recouvrement dans le bas de l'échelle avec la réfrigération commerciale pour les magasins, les restaurants et les institutions, où les systèmes industriels sont caractérisés par la complexité de leur conception. Il y a également un recouvrement avec le domaine de l'air conditionné, où certains bâtiments sont desservis par des systèmes de refroidissement centralisés conçus « sur mesure » qui s'apparentent plus à des systèmes industriels qu'aux installations typiques standardisées d'air conditionné que l'on trouve sur le marché. L'usage des systèmes de refroidissement à l'ammoniac dans les grands bâtiments est en expansion. Des systèmes spéciaux pour l'industrie des loisirs, comme les pistes de ski indoor et les murs d'escalade verglacés, sont d'autres exemples de réfrigération industrielle de niche dans le marché de la construction.

Le domaine industriel du marché de la réfrigération n'inclut généralement pas les systèmes standardisés produits en masse ni les équipements comme les distributeurs de boisson.

On distingue plusieurs types de techniques ou d'installations, mais on peut en gros les classer en deux catégories : celles qui fonctionnent sans cycle frigorifiques (free-chilling, tours de refroidissement, aéro-réfrigérants secs, refroidissement adiabatique) et celles qui fonctionnent avec cycle frigorifique. Dans tous les cas où c'est applicable, les systèmes de dissipation de la chaleur sans cycle frigorifique devraient être préférées aux systèmes de réfrigération et de refroidissement qui fonctionnent sur la base d'un cycle frigorifique, car cela permet l'économie d'une quantité significative d'énergie.

Dans la gamme des températures supérieures à 0°C, de l'eau rafraîchie est couramment utilisée.

On distingue plusieurs types d'installation :

- les installations mettant en œuvre un cycle frigorifique à compression de vapeur utilisant des agents réfrigérants fluorés ;
- les installations mettant en œuvre un cycle frigorifique à compression de vapeur utilisant des agents réfrigérants non fluorés (comme par exemple de l'ammoniac, du CO<sub>2</sub> ou des hydrocarbures) ;
- les installations mettant en œuvre un cycle frigorifique à absorption ou à adsorption. C'est dans cette catégorie que l'on trouve par exemple les systèmes solaires à sorption et la trigénération ;
- le free-chilling ;
- le refroidissement adiabatique ;
- les aéroréfrigérants secs (dry coolers) ;
- les tours de refroidissement (cooling towers) ;
- toute installation résultant d'une évolution technique en matière de production de froid. Outre les améliorations des cycles classiques, des travaux de recherche visent la réfrigération magnétique.



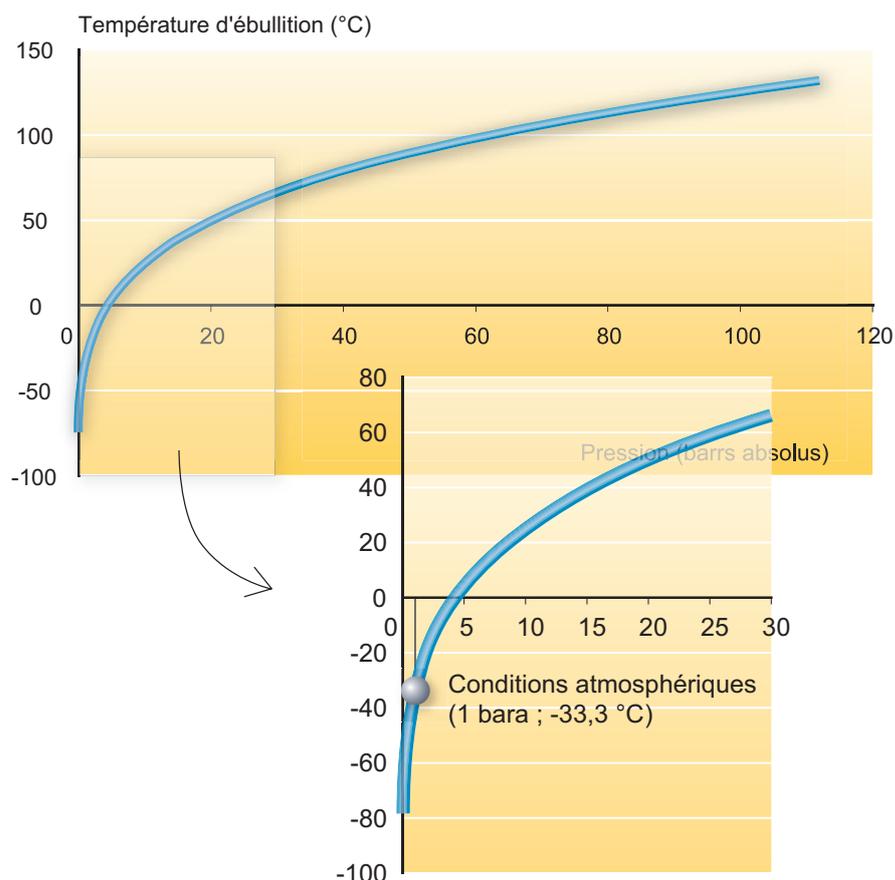
Chambre froide. Source : Copeland

## Comment retirer de la chaleur d'une zone froide et la rejeter dans une ambiance plus chaude ?...

Tout le monde sait que les échanges de chaleur s'effectuent toujours dans le sens du chaud vers le froid. Or, ce que l'on demande à une installation de réfrigération, c'est exactement l'inverse : retirer de la chaleur d'un espace où l'on désire maintenir une température inférieure à celle de l'ambiance et rejeter cette chaleur à l'ambiance, c'est-à-dire à une température plus élevée que celle de la zone de froid.

La plupart des systèmes de réfrigération utilisent un fluide frigorigène (ou : « réfrigérant ») et ses changements de phase entre les états liquides et gazeux, en faisant appel aux propriétés particulières de ces fluides, dont la température d'ébullition varie fortement avec la pression.

Ainsi par exemple, le diagramme ci-après montre comment évolue la température d'ébullition (en °C) de l'ammoniac en fonction de sa pression (en bara) [1 bara = pression atmosphérique].

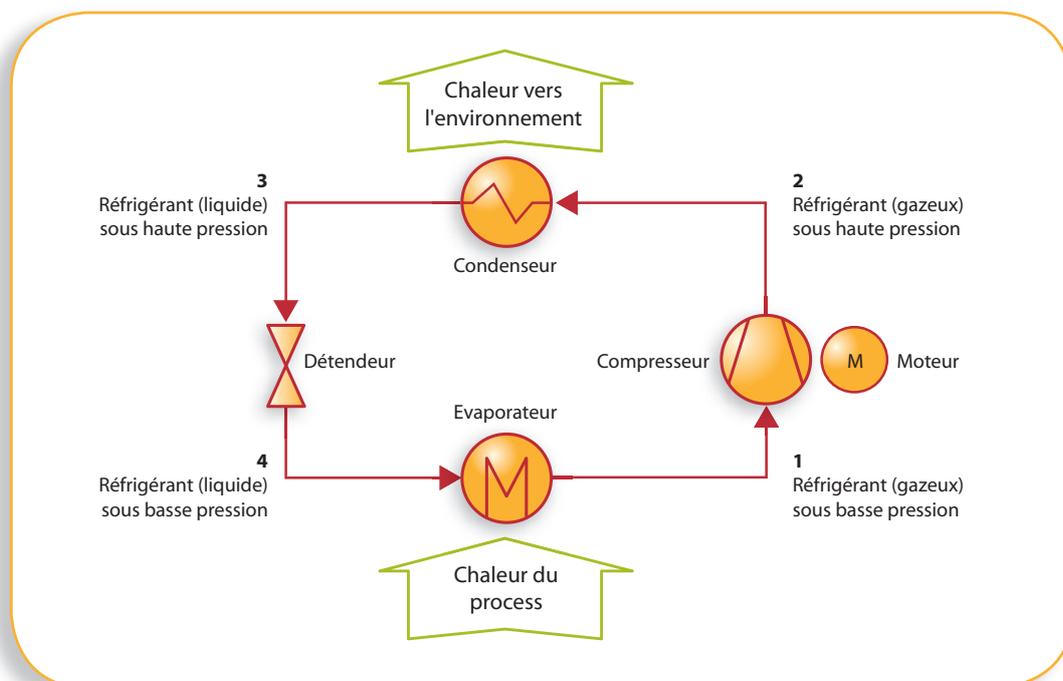


Température d'ébullition de l'ammoniac en fonction de sa pression.

Le principe de base de fonctionnement d'un cycle frigorifique est le suivant :

- circulation d'un fluide frigorigène ;
- évaporation du fluide avec production de froid (on enlève de la chaleur à la « source froide », ici le process). Reprenons l'exemple de l'ammoniac: à moins quarante degrés (-40 °C) et à la pression atmosphérique, l'ammoniac est liquide. Si on le met en contact thermique avec de l'air à 4°C (température typique d'une chambre froide), il va se réchauffer en prélevant de la chaleur à la chambre froide et commencera à se vaporiser dès qu'il atteindra sa température d'ébullition -33,3°C. L'évaporation de l'ammoniac se fera donc à basse pression, où la température d'ébullition ou de condensation est inférieure à la température ambiante de la chambre froide. Pendant le changement de phase, il va prélever une grande quantité de chaleur à la chambre froide. On a donc trouvé ici un moyen de prélever de la chaleur dans la zone froide ;
- compression du fluide, qui demande un apport d'énergie : pour passer du captage de chaleur dans la chambre froide à son élimination à l'ambiance, il faut comprimer notre ammoniac;
- condensation du fluide avec production de chaleur (on apporte de la chaleur à la « source chaude »). Si on arrive à porter notre vapeur d'ammoniac à une température supérieure à la température de l'ambiance et si on arrive à l'amener à la phase de condensation, on pourra évacuer toute la chaleur emmagasinée vers l'ambiance. La température extérieure varie selon les saisons et l'été, pendant les jours de canicule, elle peut atteindre voire dépasser 35 °C. Regardons le diagramme : pour assurer l'évacuation de la chaleur pendant la condensation de l'ammoniac, il faut que sa pression atteigne 15 bara et probablement plus (à l'étape de compression donc);
- détente du fluide. Après avoir évacué la chaleur qu'il véhicule à l'ambiance, il faut détendre l'ammoniac afin qu'il puisse s'évaporer à la température de la chambre froide (et donc que sa température d'ébullition soit inférieure à la température de la chambre froide).

La machine traditionnelle, qui a servi de base aux développements ultérieurs, est le cycle frigorifique à compression de vapeur basé sur le cycle de Carnot.



Source : Le Programme européen - Motor Challenge Program

## LE CYCLE FRIGORIFIQUE À COMPRESSION DE VAPEUR

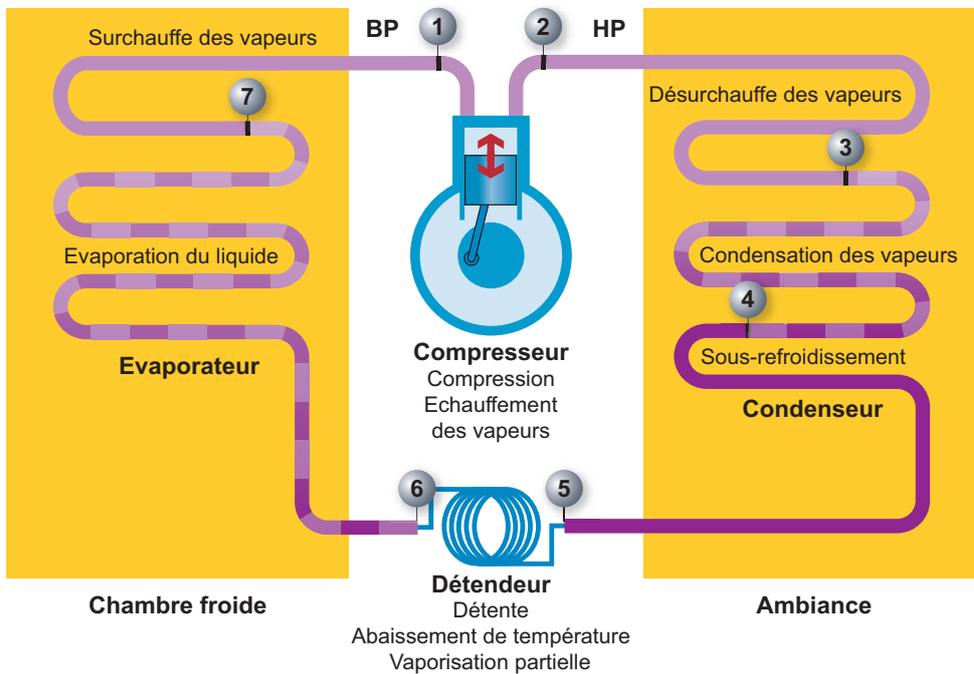


Compresseur à vis. Source : TECSIR

### Les éléments d'une machine frigorifique

Les 4 principaux composants d'un cycle frigorifique sont représentés à la figure suivante (le réfrigérant y circule dans le sens des aiguilles d'une montre) :

- un évaporateur, dans lequel un échangeur de chaleur évapore le liquide réfrigérant à basse pression (passage de 6 à 7) : la chaleur est prélevée de l'espace conditionné (le réfrigérant capte de la chaleur à la zone froide) et transférée au réfrigérant au sein de l'évaporateur, ce qui provoque sa vaporisation à basse température, produisant un gaz à faible pression et basse température
- un compresseur qui amène la vapeur de réfrigérant à haute pression et provoque son échauffement (phase 1-2) : cette unité aspire le gaz réfrigérant de l'évaporateur à travers les tubulures et le comprime à une pression plus élevée. La compression provoque également une élévation de la température du réfrigérant. Les compresseurs sont généralement situés en position centrale, dans une chambre des machines. Il en existe trois types principaux : à piston, à vis, ou turbo.
- un condenseur, à haute pression, dans lequel le réfrigérant entre à une température plus élevée que l'ambiance et cède de la chaleur à l'ambiance en se condensant (phase 3-4) : généralement éloigné des autres composants, l'échangeur de chaleur transfère la chaleur du réfrigérant vers l'air ambiant. Le gaz réfrigérant sous haute pression arrivé du compresseur est condensé en même temps qu'il est refroidi dans le condenseur, sous une pression à peu près constante. C'est ensuite un liquide réfrigérant à haute pression et température moyenne qui quitte le condenseur.
- enfin, un détendeur qui ramène le réfrigérant liquide à la pression d'entrée de l'évaporateur (phase 5-6) : il détend le liquide sous haute pression de manière contrôlée. Lorsque le réfrigérant est détendu, sa température d'ébullition baisse. Le réfrigérant reprend alors un nouveau cycle.



Les 4 éléments d'un groupe de froid à compression de vapeur.  
Source : CD Rom Energie +, version 6

Suivant les applications, le système peut également comporter des évaporateurs, compresseurs et condenseurs multiples.



Compresseur de Réfrigération. Source : DRIRE

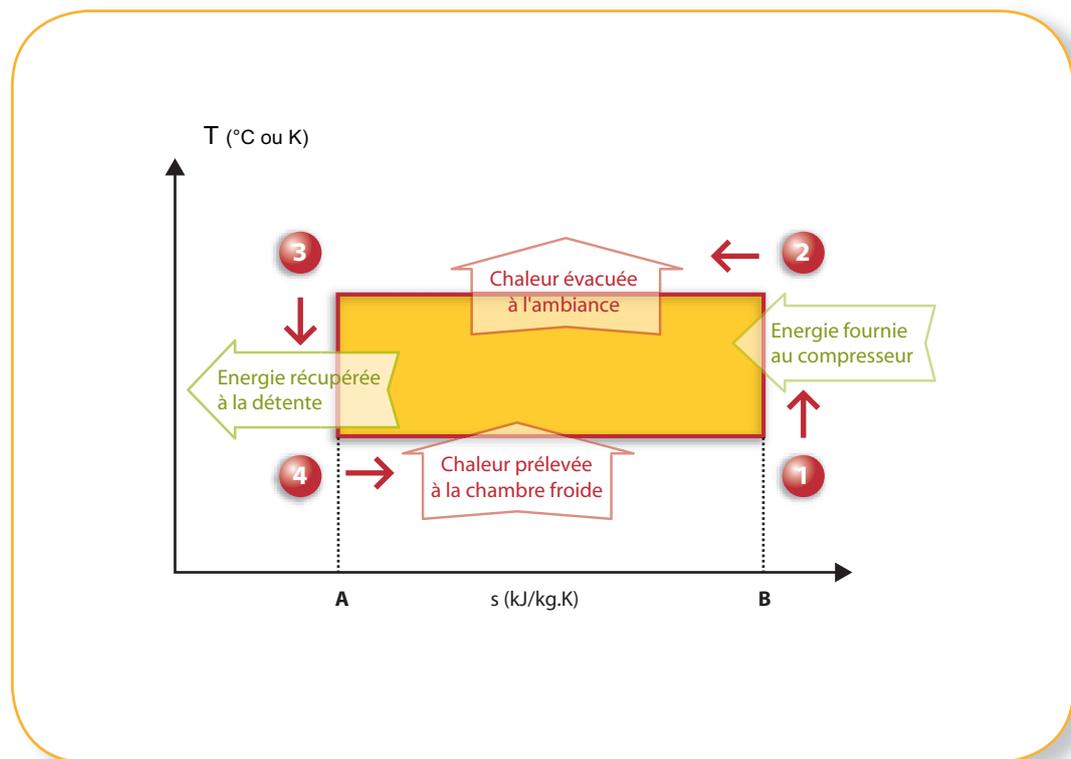
# Le cycle de Carnot

## Le cycle idéal

Le cycle idéal de Carnot est le cycle qui présente le rendement maximum qui ne sera jamais ni égalé ni dépassé. Il est représenté à la figure suivante dans le diagramme T-s bien connu des étudiants en thermodynamique, qui porte en abscisse l'entropie spécifique  $s$  du réfrigérant [en  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ], et en ordonnée sa température [en  $^{\circ}\text{C}$  ou en  $\text{K}$ ].

Le cycle est constitué de 4 opérations :

- 1-2 : une compression adiabatique ( $s = \text{constante}$ ). Le compresseur reçoit un certain travail mécanique.
- 2-3 : une évacuation de la chaleur transportée par le réfrigérant à l'ambiance (= source chaude) dans un échangeur fonctionnant à température constante.
- 3-4 : une détente adiabatique du fluide réfrigérant. L'énergie dégagée par cette détente doit en principe pouvoir être récupérée pour alimenter le compresseur. Cela pourrait s'imaginer par une détente dans une turbine actionnant directement l'axe du compresseur. Le fluide se refroidit.
- 4-1 : le prélèvement d'une certaine quantité de chaleur de la source froide (= process à refroidir, chambre froide).



Le cycle de Carnot.

L'énergie fournie à un processus ou dégagée par lui est calculée en intégrant la fonction  $Tds$  sur son parcours.

La quantité de chaleur prélevée à la source froide est représentée graphiquement sur le diagramme T-s par l'aire du rectangle A-4-1-B, et se calcule par :

$$Q_1 = \int_4^1 T ds = T_1 (s_1 - s_4)$$

De même, la chaleur évacuée vers l'ambiance (source chaude) est représentée graphiquement sur le diagramme T-s par l'aire du rectangle A-3-2-B, et se calcule par :

$$Q_2 = \int_3^2 T ds = T_2 (s_2 - s_3)$$

Par conservation de l'énergie, toute l'énergie fournie au système doit en sortir. L'énergie nette à fournir au compresseur (en supposant que toute l'énergie récupérée à la détente est transmise à la compression) est représentée par le rectangle coloré 1-2-3-4, et se calcule comme suit :

$$W = Q_2 - Q_1 = (T_2 - T_1) * (s_2 - s_3) = (T_2 - T_1) * (s_1 - s_4)$$

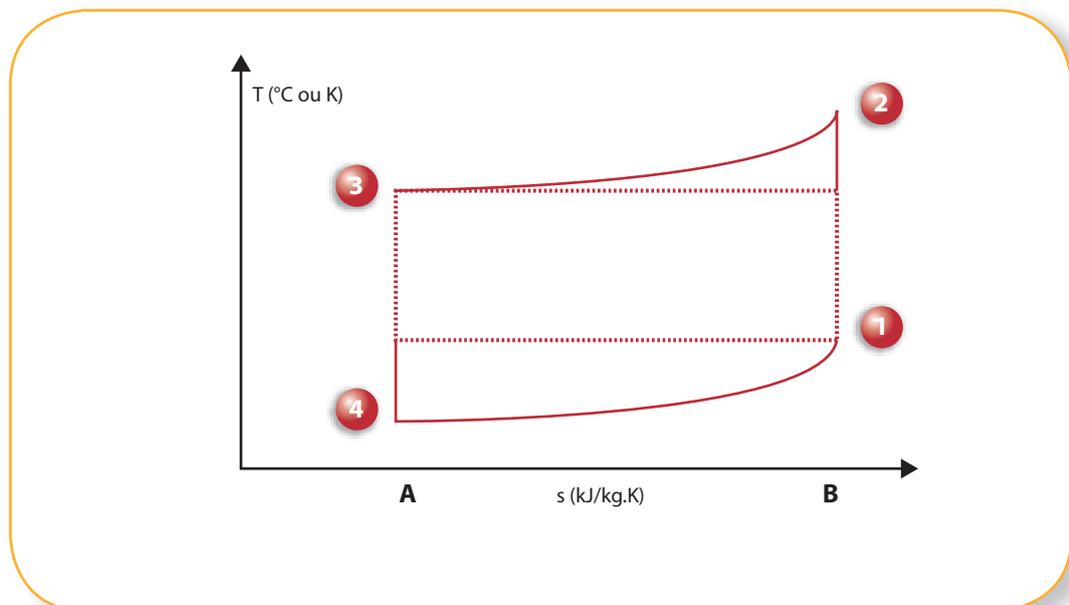
L'efficacité énergétique EE du cycle de Carnot s'exprime comme le rapport entre la quantité de chaleur prélevée à la source froide et l'énergie nette à fournir au compresseur :

$$EE = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

## Du cycle de Carnot au cycle réel

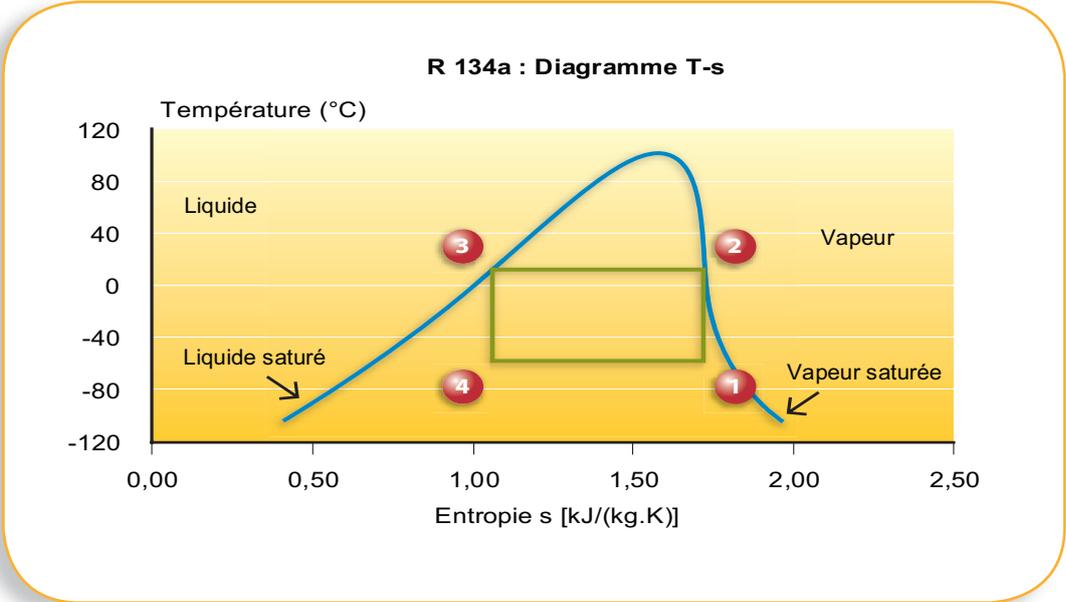
Le cycle idéal de Carnot est irréalisable, soit parce que les phénomènes réels diffèrent, soit parce que certaines précautions techniques doivent être prises pour ne pas endommager le matériel, soit enfin parce que certains éléments du cycle seraient trop onéreux et détérioreraient totalement la rentabilité financière du système. Mais comme il est le plus performant, on va essayer de s'en approcher le plus possible.

Avant tout, on va essayer de conserver autant que possible l'aspect rectangulaire du cycle dans le diagramme T-s. On sait déjà que l'on doit utiliser un fluide compressible, donc un gaz, pour pouvoir placer le réfrigérant dans des conditions où il est capable d'une part de prélever de la chaleur dans la chambre froide et d'autre part d'évacuer de la chaleur à l'ambiance. Mais si on utilise un fluide qui demeure en phase gazeuse dans tout le cycle, sa température ne va pas se maintenir constante au cours de son parcours de l'un et l'autre des deux échangeurs de chaleur : en contact avec la chambre froide, il entrera dans l'échangeur à très basse température et en sortira au mieux à une température égale à celle de la chambre froide. A l'inverse, en contact avec l'ambiance, il entrera dans l'échangeur à une température élevée et se refroidira au mieux jusqu'à la température de l'ambiance. Dans un diagramme T-s, le cycle ne serait plus représenté par un rectangle mais par la figure ci-dessous où les zones supérieure et inférieure au rectangle figurent les quantités d'énergie supplémentaires qu'il faudrait consommer.



Donc, pour s'assurer que les échanges thermiques tant à la chambre froide qu'à l'ambiance s'effectuent à température constante, on utilisera une vapeur condensable comme fluide caloporteur et on se mettra, dans chaque échangeur, dans des conditions où le fluide réfrigérant change de phase, phénomène qui s'effectue toujours à température constante et qui représente les meilleures conditions opératoires pour un échange de chaleur car elles exploitent le potentiel très important que représente la chaleur latente de vaporisation/condensation du fluide.

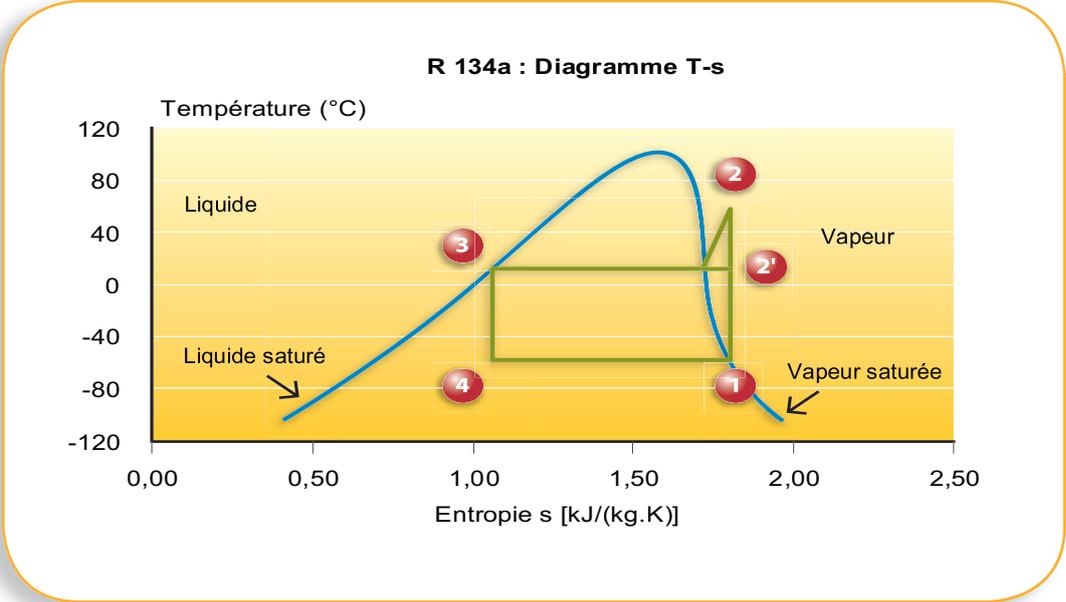
On va donc placer le cycle dans un diagramme T-s caractéristique du fluide réfrigérant de telle sorte que les phases d'échange de chaleur soient en zone de changement de phase (voir figure). La courbe en bleu figure la courbe de saturation du réfrigérant. A sa gauche, le fluide est liquide et à sa droite, il est à l'état de vapeur. En-dessous de la courbe en cloche, les deux phases coexistent. Tel qu'il apparaît en rouge, le cycle de Carnot est complètement contenu dans cette zone diphasique.



**Compression sèche**

Mais l'examen de la figure ci-avant montre que nous rencontrons de suite un problème : la compression s'effectue sur un fluide partiellement gazeux, partiellement liquide. Or la présence de liquide dans le compresseur est dangereuse : les gouttelettes de liquide peuvent endommager les soupapes, elles peuvent également « nettoyer » l'huile de lubrification sur les parois du compresseur et ainsi accélérer son usure. Même à la sortie du compresseur, en principe dans des conditions de vapeur saturée, il peut subsister des gouttelettes de liquide. En effet, il faut considérer le point 2 comme une moyenne des conditions régnant à la sortie du compresseur, avec des zones de vapeur surchauffée et des poches de liquide qui peuvent subsister.

Par sécurité donc, on effectuera la compression en conditions de vapeur sèche en prolongeant le palier 4-1 jusqu'à la courbe de vapeur saturée. Dans ces conditions, il faudra augmenter la pression (et la température) de sortie du compresseur (point 2) car il sera impossible d'amener le fluide sur son palier de condensation selon une horizontale partant du point 2'. La corne qui apparaît à droite de la courbe de saturation génère évidemment une surconsommation d'énergie pour assurer la surchauffe de la vapeur.

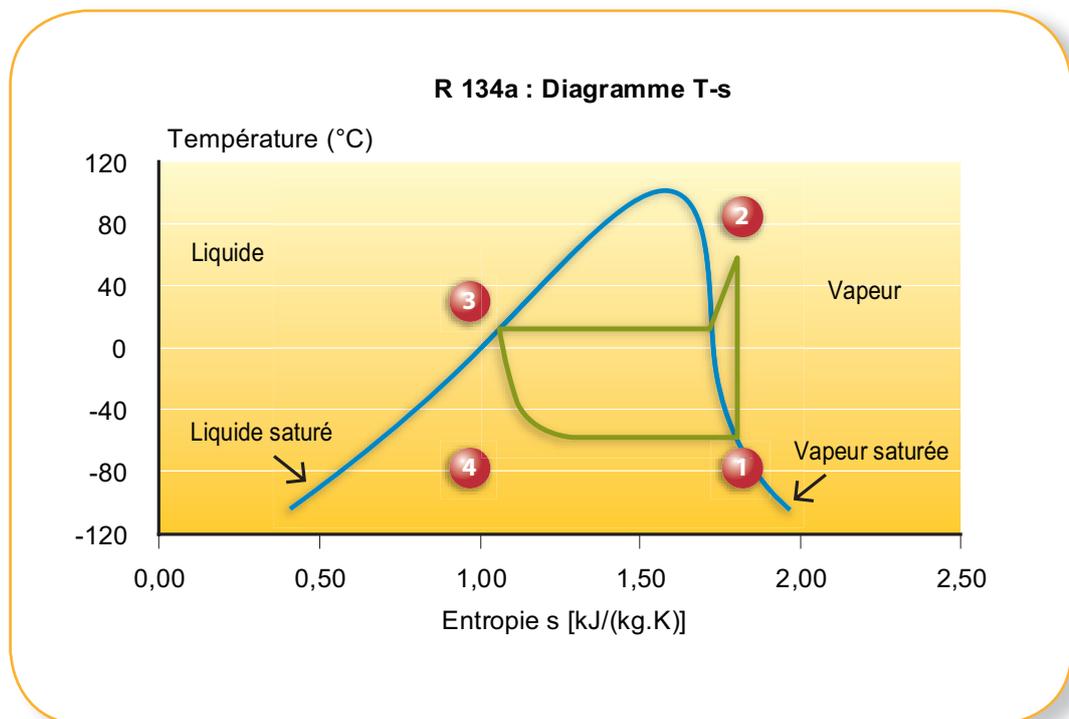


## Détente simple

En principe, le cycle de Carnot considère que l'énergie libérée à la détente du fluide entre le condenseur et l'évaporateur est récupérée pour contribuer à l'alimentation du compresseur. En pratique toutefois, cela présente un certain nombre de difficultés qui font qu'en général, on en abandonne l'idée :

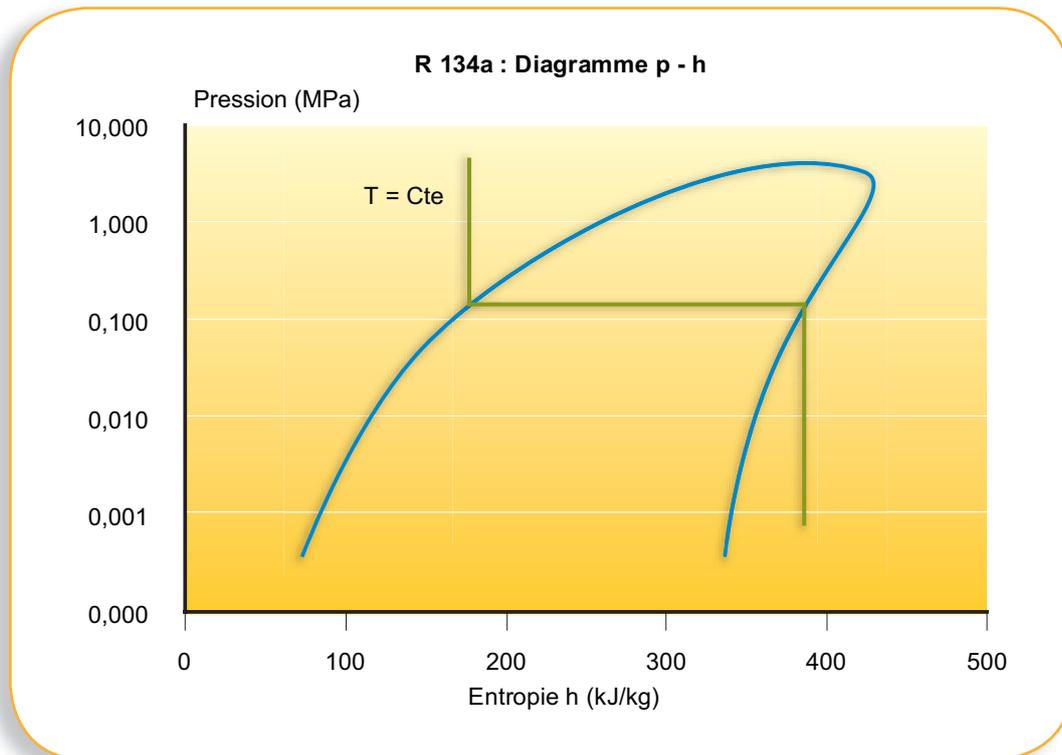
- l'énergie récupérable ne représente qu'une faible fraction de ce qu'il faut apporter au compresseur ;
- une turbine pourrait être installée mais elle sera traversée par un fluide diphasique (mélange vapeur-liquide), ce qui pose de gros problèmes techniques ;
- la rentabilité du processus est loin d'être démontrée.

En général, on se contentera d'établir un étranglement au passage du fluide pour lui faire subir une perte de charge suffisante. Ce type de détendeur peut être constitué par une vanne ou un serpentin de faible diamètre et de longueur calculée ou fixée par essais et erreurs. La détente qui y est réalisée s'effectue pratiquement sans échange de chaleur (isenthalpique), phénomène irréversible augmentant l'entropie du fluide. On se retrouve donc maintenant avec le diagramme suivant:



En pratique, le cycle assure donc les phénomènes suivants :

- 1-2 : compression de vapeur saturée sèche avec surchauffe jusqu'à la pression de condensation ;
- 2-3 : désurchauffe et condensation en évacuant la chaleur vers l'ambiance ;
- 3-4 : détente sans échange de chaleur pour amener le fluide à la pression de l'évaporateur
- 4-1 : évaporation du fluide avec prélèvement de chaleur dans la chambre froide à climatiser.



### Dans la pratique, c'est le diagramme p – h qu'on utilise

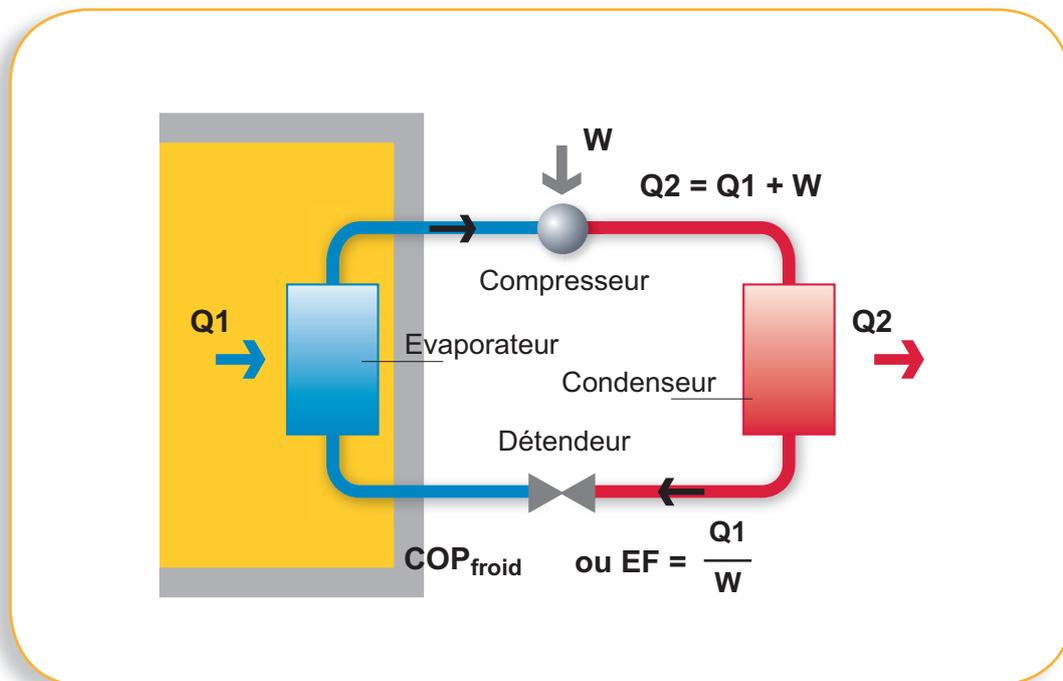
Personne ne mesure l'entropie d'un fluide. Et en pratique, le frigoriste relèvera plus facilement des pressions que des températures. Dans ces conditions, le diagramme T-s qui a été utilisé ici à des fins pédagogiques, n'est que de peu d'utilité.

Par contre, le frigoriste s'intéresse directement aux quantités de chaleur échangées au condenseur et à l'évaporateur et qui se mesurent par des différences d'enthalpie. Aussi, c'est dans un diagramme pression-enthalpie (p-h) que les considérations ci-avant seront retranscrites.

## Bilan d'énergie et efficacité énergétique d'un système de réfrigération à compression de vapeur

Une machine frigorifique est énergétiquement efficace si elle demande peu d'énergie pour fournir une puissance frigorifique donnée.

Les flux d'énergie d'un système de réfrigération à compression de vapeur, sont détaillés dans le schéma ci-dessous.



Bilan d'énergie d'une machine frigorifique. Source : CDRom Energie +, version 6

Par conservation de l'énergie, toute l'énergie fournie au système doit en sortir. On peut donc dire que la chaleur captée à l'évaporateur ( $Q_1$ ) par le réfrigérant dans la chambre froide, augmentée de l'énergie fournie au compresseur ( $W$ ) doit être évacuée à l'ambiance par le condenseur ( $Q_2$ ) :

$$Q_1 + W = Q_2$$

Dans ces conditions, on définit l'efficacité énergétique  $EE$  du groupe de froid comme le rapport :

$$EE = \frac{\text{Chaleur captée dans la zone froide}}{\text{Energie fournie par le compresseur}} = \frac{Q_1}{W}$$

Ce rapport est une mesure du rendement de l'installation puisqu'il mesure la performance de la machine rapportée à la consommation d'électricité. Typiquement, sa valeur se situe entre 2 et 3, voire plus.

Il est appelé également COPfroid en référence aux termes anglais « **Coefficient of Performance** », bien que cela puisse créer une confusion avec le COP d'une pompe à chaleur.

#### **COPfroid et COPchaud**

Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur est exactement le même que celui d'une machine frigorifique, on y prélève aussi de la chaleur à une source froide pour la restituer à une source chaude. Mais dans le cas d'une pompe à chaleur, on désire assurer une température prescrite à la source chaude et on définit donc un COPchaud comme le rapport entre la chaleur restituée à la zone chaude et l'énergie dépensée par le compresseur :

$$\text{COPchaud} = Q2/W$$

Par conservation de l'énergie, on peut montrer que :

$$\text{COPchaud} = EE + 1$$

#### **Pense-bête pour optimiser un système frigorifique**

Rappelez-vous du cycle de Carnot : l'**efficacité énergétique EE** est proportionnelle au rapport de températures :

**Tévaporateur**

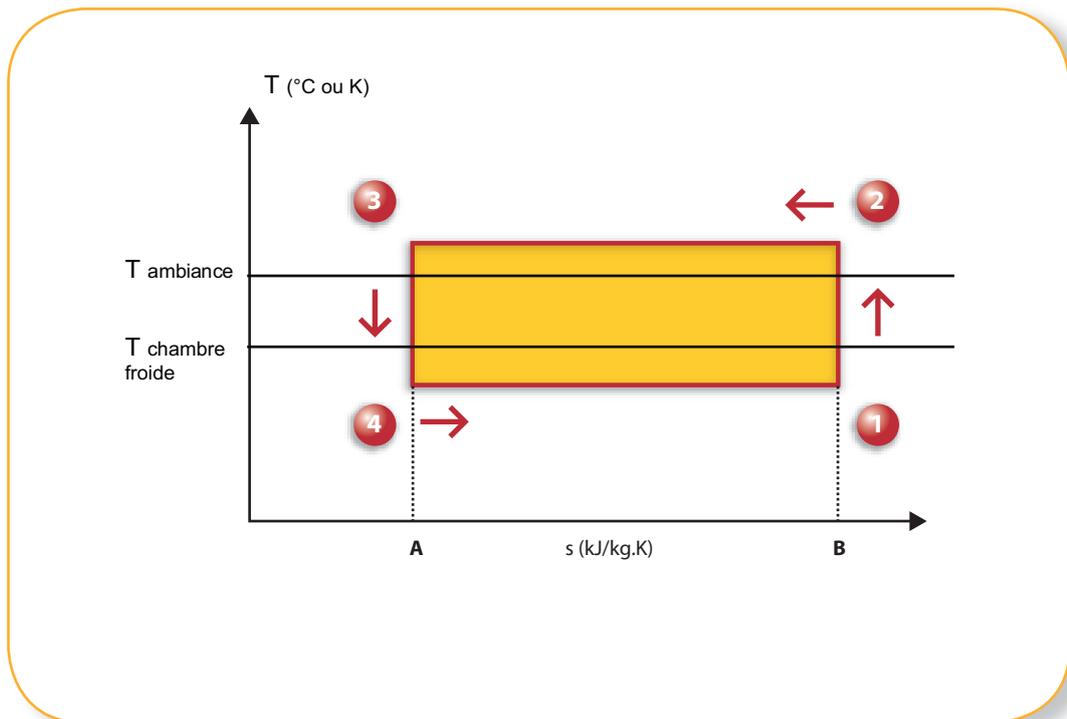
**Tcondenseur - Tévaporateur**

où T représente la température des éléments exprimée en Kelvins.

Retenez bien ce ratio, il va souvent guider vos démarches lors de la recherche d'économies d'énergie. En effet, on peut déjà effectuer plusieurs constats :

- l'efficacité est d'autant meilleure que la température de l'évaporateur (T1) est élevée. Il est donc inutile et coûteux de refroidir plus que de raison ;
- l'efficacité est également d'autant meilleure que l'écart de températures entre condenseur (T2) et évaporateur (T1) est faible.

Mais, le choix des températures n'est pas totalement libre. En effet, la température de la chambre froide est une consigne imposée : de l'ordre de 4°C pour un compartiment frigo et de -20°C pour un surgélateur, et des températures variables pour les process. Et la température d'ambiance est en général imposée par une consigne de confort thermique s'il s'agit d'un local ou par la météo si la chaleur est évacuée à l'extérieur. Or, pour pouvoir prélever de la chaleur à la chambre froide, la température d'ébullition du réfrigérant dans l'évaporateur doit être plus basse que celle de la chambre froide. De même, pour céder de la chaleur à l'ambiance, la température d'ébullition dans le condenseur doit être plus élevée que celle qui règne à l'extérieur. Donc, en reprenant dans la figure ci-dessous un cycle idéal de Carnot, l'écart (T2 – T1) doit être supérieur à celui qui existe entre l'ambiance et la chambre froide.



Donc, l'écart de températures qui figure dans le calcul de l'efficacité énergétique est plus grand que celui qui règne entre la chambre froide et l'air ambiant. Les paramètres sur lesquels on peut jouer sont donc plutôt l'écart entre le réfrigérant et l'ambiance, et celui entre le réfrigérant et la chambre froide.

On peut donc en déduire que l'on doit trouver des écarts de température optimum :

- entre la chambre froide et le réfrigérant dans l'évaporateur ;
- entre l'ambiance et le réfrigérant dans le condenseur.

Si ces écarts sont trop faibles, les échanges de chaleur n'ont pas lieu ou alors les surfaces d'échange à installer sont gigantesques. S'ils sont trop importants, c'est la facture d'électricité qui devient gigantesque.

On ne doit donc pas refroidir à l'excès les produits à réfrigérer, il est inutile et coûteux de descendre beaucoup plus bas que la consigne imposée. Si la température d'évaporateur ( $T_1$ ) est trop faible, le numérateur de EE diminue et son dénominateur augmente, ces deux tendances agissent de manière défavorable sur l'efficacité énergétique.

D'autre part, il est intéressant de moduler la température (et donc la pression) du fluide en haute pression, au moment où il cède sa chaleur à l'ambiance. Si le dimensionnement de l'installation et les consignes de charge sont déterminés en tenant compte de possibles journées caniculaires, il est pénalisant de travailler dans les mêmes conditions en mi-saison et en hiver.

## N'oublions pas les auxiliaires

On a intérêt à évaluer également l'efficacité globale de l'installation en ajoutant à l'électricité consommée par le compresseur, celle de tous les éléments auxiliaires.

Ces auxiliaires varient selon la situation rencontrée :

- Les frigories sont parfois transférées directement par un échangeur de chaleur (exemple d'un évaporateur qui se situe à l'intérieur de la chambre froide), mais elles peuvent aussi être transférées via un circuit de refroidissement secondaire, en particulier si le risque de contamination dans le cas d'un défaut de la boucle de réfrigération est élevé (exemple du groupe de froid qui prépare de « l'eau glacée » qui est acheminée vers un échangeur disposé dans la chambre froide). Dans ce cas, il convient de tenir compte de la consommation de la pompe de ce circuit secondaire.
- Dans la zone froide, on peut être amené à assurer une température homogène par un brassage de l'air au moyen d'un ventilateur.
- L'évacuation de la chaleur du condenseur à l'ambiance s'effectue soit en faisant circuler directement de l'air ou de l'eau sur le condenseur (condenseur évaporatif), soit par l'intermédiaire d'un circuit d'eau qui est lui-même équipé d'une tour de refroidissement. Là aussi, il convient de repérer les consommations des pompes et ventilateurs de ces différents circuits.



Chambre froide. Source: Bagaiteknik

## FROID, ENVIRONNEMENT ET SECURITE



Réfrigérants. Source : rtrsuplicers

### Environnement

Certains réfrigérants utilisés dans les systèmes de réfrigération à compression de vapeur ont des effets dommageables pour l'environnement notamment lorsqu'ils sont rejetés dans l'atmosphère.

Parmi ceux-ci, les agents réfrigérants fluorés sont les plus redoutables. Ces produits commercialisés sous des noms divers (Fréon, Forane, Iscéon...) sont classés en groupes selon leur composition chimique. On distingue les ChloroFluoroCarbures (CFC), les Hydro ChloroFluoroCarbures (HCFC), les HydroFluoroCarbures (HFC), et les PerFluoroCarbures (PFC).

Les CFC et, dans une moindre mesure, les HCFC ont un rôle important dans la destruction de la couche d'ozone qui, si elle se poursuivait, pourrait menacer la vie sur la terre.

Sous l'impulsion de la communauté scientifique et des organisations internationales, le remplacement des CFC et des HCFC par les HFC, a permis de réduire significativement la concentration de chlore dans l'atmosphère, responsable de la destruction de l'ozone stratosphérique.

Seulement, toutes ces molécules, y compris les HFC, se révèlent être de puissants gaz à effet de serre qui contribuent directement aux changements climatiques. Par exemple, le HCFC le plus communément utilisé, le monochlorodifluorométhane ou HCFC-22 a un PRG (un potentiel de réchauffement global) 1 800 fois plus élevé que le CO<sub>2</sub>.

Les agents réfrigérants non fluorés (ammoniac, CO<sub>2</sub>, hydrocarbures) ne sont pas exempts de dangers, mais leur impact est moindre.

### Interdiction progressive d'utiliser certains fluides frigorigènes

Pour remédier à ces problèmes, des accords internationaux ont été conclus et les états signataires doivent prendre les mesures adéquates pour les faire respecter. Il a été décidé d'interdire l'utilisation des fluides les plus dangereux et de ne permettre celle des autres que dans des conditions qui minimisent leur impact sur l'environnement.

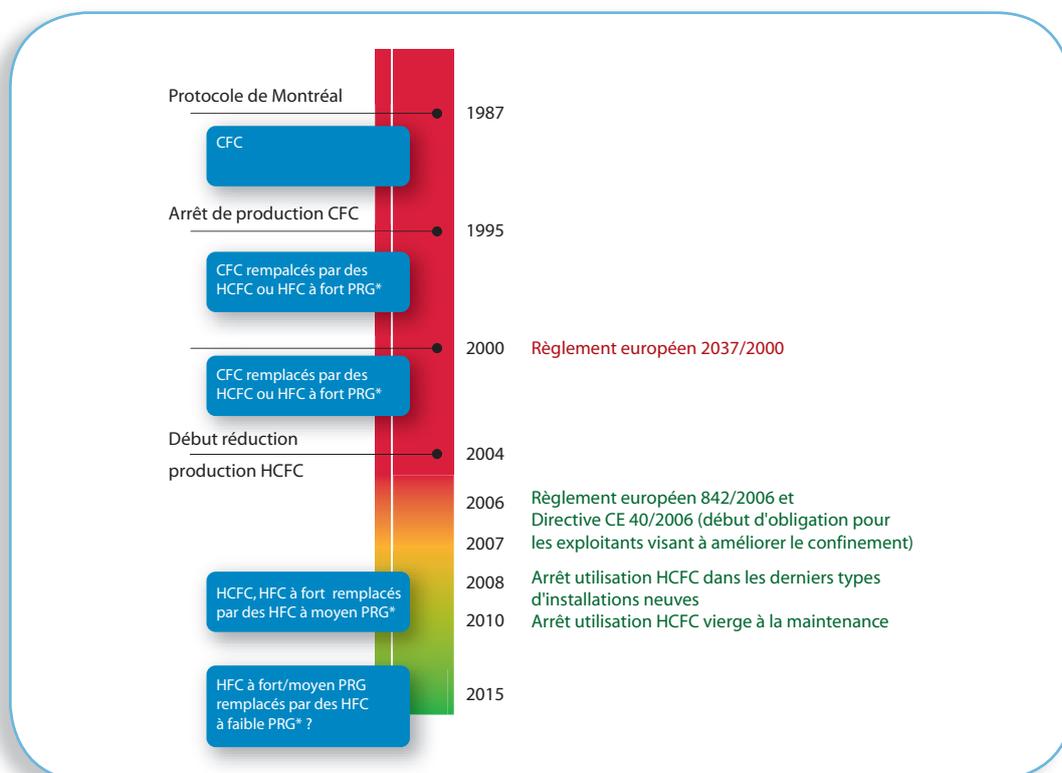
Les mesures visant la récupération, le recyclage, la régénération et la destruction des substances réglementées, ainsi que les exigences concernant les techniciens de la réfrigération, doivent bien entendu être respectées mais n'ont pas d'impact direct en termes énergétiques dans les installations.

Par contre, les mesures visant des interdictions d'utilisation peuvent avoir des impacts énergétiques importants pour les installations existantes qui, selon leurs caractéristiques, devront être remplacée ou modifiée pour fonctionner avec un fluide autorisé, lorsqu'un appoint de fluide devra être effectué (recharge d'installation existante dans le cadre d'une maintenance lorsqu'il manque de fluide frigorigène dans le circuit frigorifique).

Ainsi les CFC, couramment utilisés par le passé comme fluides réfrigérants, ont été progressivement supprimés sur la base du protocole de Montréal de 1987. Ils sont interdits de production depuis 1995, leur mise sur le marché est interdite depuis le 1er octobre 2000, leur utilisation en maintenance est interdite depuis le 1er janvier 2001, et leur élimination totale doit avoir lieu pour fin 2010.

La conception d'installations neuves de réfrigération et de conditionnement d'air utilisant des HCFC est interdite depuis le 1er octobre 2000. L'utilisation de HCFC vierges pour recharger les circuits frigorifiques lors d'une maintenance est interdite depuis le 1er janvier 2010. Cela signifie que les installations qui en contiennent ne peuvent donc désormais être utilisées que tant qu'un appoint de fluide n'est pas indispensable, ou si l'appoint est réalisé avec des HCFC recyclés. L'utilisation de HCFC sera purement et simplement interdite à partir du 1er janvier 2015. Ces installations doivent donc être modifiées ou remplacées par des installations utilisant des fluides autorisés.

Actuellement, les HFC/PRC sont les principaux produits de remplacement des HCFC et d'autres substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO). Mais Les HFC/PFC, qui ne sont pas des SAO, sont des gaz à effet de serre puissants et sont actuellement au nombre des gaz à effet de serre réglementés par le Protocole de Kyoto.



PRG\* : Pouvoir de Réchauffement Global. Source : CD-Rom Energie+, version 6



Technique maintenance. Source : [www4b](http://www4b).

## Sécurité

La norme NBN EN 378-1 : 2008, relative aux systèmes de réfrigération et pompes à chaleur, fournit des règles pratiques aux concepteurs et installateurs qui satisfont les exigences de sécurité et d'environnement. Tous les fluides sont concernés, mais ceux qui ont des caractéristiques pouvant représenter un danger pour les personnes et l'environnement (toxicité, inflammabilité et pression) subissent des contraintes plus importantes.

La notion phare de la norme est de définir d'éventuels seuils maximaux de charge en fluide frigorigène, en fonction du lieu d'implantation de l'installation, du type de système de réfrigération mais surtout de la nature du fluide. Les exigences ne sont pas les mêmes selon le type d'occupation des bâtiments (accessibilité et degré d'information des personnes qui y ont accès).

Le type du système de réfrigération est également un facteur à prendre en considération dans l'évaluation des risques. Deux typologies de système existent :

- Systèmes directs : l'évaporateur ou le condenseur du système de réfrigération est en contact direct avec l'air ou le milieu à refroidir ou à chauffer. Les systèmes dans lesquels un fluide de refroidissement secondaire est en contact direct avec l'air ou les marchandises à refroidir ou à chauffer (systèmes à pulvérisation ou à conduit) doivent être considérés comme des systèmes directs.
- Systèmes indirects : l'évaporateur refroidit ou le condenseur chauffe le fluide caloporteur qui circule dans un circuit fermé qui contient des échangeurs thermiques en contact direct avec le milieu à traiter.

Dans la mesure où les risques potentiels avec les systèmes indirects sont moindres, la charge maximale autorisée est plus élevée qu'avec un système direct.

|                       |       | ODP   | GWP  | Inflammable | Toxique | Substance naturelle |
|-----------------------|-------|-------|------|-------------|---------|---------------------|
| Réfrigérants naturels | C02   | 0     | 1    | -           | -       | oui                 |
|                       | HC    | 0     | +/-0 | ++          | -       | oui                 |
|                       | NH3   | 0     | +/-0 | +           | +       | oui                 |
| HFC                   | R134a | 0     | 1300 | -           | -       | non                 |
|                       | R410A | 0     | 1900 | -           | -       | non                 |
|                       | R407C | 0     | 1600 | -           | -       | non                 |
| HCFC                  | R22   | 0,055 | 1700 | -           | -       | non                 |

ODP : Ozone Depleter – substance appauvrissant la couche d'ozone(SAO)  
GWP : Global Warming Potential – Potentiel de réchauffement global (PRG)

## QUE FAIRE POUR CONTINUER À PRODUIRE DU FROID ?



Contrôle de la qualité de combustion. Source : ecologie.

### La démarche

Le secteur du froid procède depuis 20 ans à des modifications de ses pratiques.

L'évaluation environnementale complète du secteur d'activité « froid » nécessite la prise en compte d'une part des effets directs des fluides frigorigènes utilisés, et d'autre part des effets indirecte c.-à-d. les consommations énergétiques des systèmes thermodynamiques – qui représentent 15 % de l'électricité consommée dans le monde. La consommation électrique des systèmes frigorifiques contribue indirectement à l'émission d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>.

Selon l'IIF (2004), 20 % de l'impact de la production de froid sur le réchauffement climatique est imputable aux émissions des fluides halogénés dans l'atmosphère, contre 80% provenant des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie consommée dans ces installations.

Les consommations énergétiques des installations représentent donc l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre d'un système tout au long de son exploitation. L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques et l'utilisation de fluides frigorigènes à faible potentiel de réchauffement global (PRG) sont des priorités qui obligent le secteur du froid à accomplir de nouvelles mutations. Ce sont les outils environnementaux, comme l'analyse cycle de vie, qui rendent compte du compromis à trouver entre ces deux facteurs direct et indirect.

Par ses propriétés thermodynamiques, le fluide frigorigène influence la consommation énergétique de la machine frigorifique.

L'objectif d'une optimisation environnementale est d'adapter l'architecture du circuit frigorifique aux propriétés d'un fluide à faible potentiel de réchauffement global.

L'utilisation de fluides comme le dioxyde de carbone, l'ammoniac, l'eau, ou encore les hydrocarbures comme le propane et l'iso-butane, peut dans certains cas être une solution à la problématique des gaz fluorés à PRG élevé, à moins que l'industrie chimique parvienne à développer des molécules à faible PRG et aux performances énergétiques plus élevées que celles des fluides naturels.

Cependant, autant la réglementation associée au Protocole de Montréal s'est traduite par un calendrier rapide d'arrêt de production des CFC et des HCFC, autant il semble peu probable qu'à l'échelle mondiale les HFC puissent disparaître rapidement. En effet, il n'est pas si facile de trouver des remplaçants pour les HFC. Les HFC peuvent facilement remplacer les CFC dans la majorité de leurs applications, tout en offrant une bien meilleure efficacité énergétique et en réduisant la quantité de gaz nécessaire. Les émissions de HFC sont aujourd'hui contrôlées et jugées indésirables pour l'environnement à cause de leur PRG, mais ces gaz seront sans doute encore utilisés dans l'industrie du froid faute d'alternative aussi intéressante: ceci est dû à la fois aux contraintes de sécurité associées à l'utilisation des hydrocarbures ou de l'ammoniac, et au fait qu'aucune molécule chimique simple présentant l'ensemble des caractéristiques souhaitables n'est actuellement disponible.

Pour continuer à produire du froid, cinq pistes peuvent être poursuivies :

- L'utilisation responsable des gaz fluorés HFC à PRG élevés : efficacité énergétique élevée permettant une réduction des charges, obtention d'un très haut niveau de confinement (réduction des taux de fuites) des nouveaux appareillages, amélioration de la récupération et du recyclage des gaz fluorés pendant tout leur cycle de vie.
- Le développement de nouvelles molécules de synthèse à faible PRG (développement de nouveaux substituts aux HFC actuellement utilisés), fluorées ou non fluorées, qui conservent les excellentes propriétés des HFC et qui fonctionnent donc avec les architectures de cycles frigorifiques traditionnels qui leur sont bien adaptées.
- L'utilisation des fluides naturels et l'adaptation de l'architecture du cycle frigorifique aux propriétés du fluide.
- L'utilisation de cycles frigorifiques alternatifs tels que les systèmes solaires à sorption.
- L'utilisation de procédés sans cycle frigorifique.

## Quels fluides frigorigènes utiliser ?

Un réfrigérant doit rencontrer un certain nombre d'exigences.

- Pour des raisons d'efficacité, il doit avoir une faible chaleur latente de vaporisation, et un point de rosée à une pression techniquement atteignable.
- Pour des raisons d'applicabilité, il doit avoir une haute stabilité chimique.
- Pour des raisons de sécurité, il ne doit pas être inflammable, explosif ou toxique (ou, pas trop ...).
- Pour des raisons environnementales, il doit avoir un faible impact sur la couche d'ozone et un faible pouvoir de réchauffement global.

| Réfrigérants                | Avantages   | Inconvénients  | Commentaires   |
|-----------------------------|---|--|--|
| HFC                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Faible toxicité</li> <li>○ ininflammabilité (ou inflammabilité modérée dans le cas du HFC-152a)</li> <li>○ Solutions sur mesure pour l'efficacité énergétique</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ PRG élevé, mais des HFC à PRG plus faible sont en cours de développement</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Confinement possible</li> <li>○ La charge réduite minimise les quantités de HFC utilisées</li> </ul>  |
| Hydrocarbures (HC)          | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ PRG faible</li> <li>○ Efficacité énergétique</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Très inflammables et potentiellement explosifs</li> <li>○ Précurseurs de l'ozone troposphérique</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Exigences en matière de sécurité</li> <li>○ Souvent limités dans les lieux publics</li> <li>○ Adaptés pour les appareillages étanches et à faible charge</li> </ul> |
| CO <sub>2</sub>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ PRG = 1</li> <li>○ Efficace à faible température ou combiné avec un système de chauffage</li> <li>○ Faible toxicité</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Risque d'asphyxie</li> <li>○ Pression très élevée</li> <li>○ Efficacité réduite à température élevée</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Technologie exigeante</li> <li>○ Solutions hybrides efficaces HFC/CO<sub>2</sub></li> <li>○ Liquide secondaire idéal</li> </ul>                                     |
| Ammoniac (NH <sub>3</sub> ) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Aucun PRG</li> <li>○ Efficacité énergétique</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Toxique et inflammable</li> <li>○ Les mesures de sécurité nuisent aux coûts et à l'efficacité</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Utilisation limitée essentiellement à la réfrigération industrielle</li> <li>○ Matériaux spécifiques requis</li> </ul>  |

Source : [www.fluorocarbons.com](http://www.fluorocarbons.com)

Le coût du fluide frigorigène rapporté à celui de l'installation se situe entre 1 et 3 %, ce qui reste faible. Attention que les coûts indirects liés au choix du fluide (dispositifs de sécurité, équipements électriques anti-déflagrants, conception étanche du local technique,...) sont sans doute plus déterminants.

## Les fluides fluorés

Les CFC, HCFC et HFC ont des propriétés physiques similaires. Ils présentent par contre des différences de comportement chimique et physico-chimique. Ce sont des gaz ou des solvants qui se prêtent bien comme liquide réfrigérant dans les machines à froid. En modifiant leur composition, on peut influencer notamment leur point d'ébullition, et l'on peut trouver ainsi pour chaque application de froid le liquide le mieux adapté.

### R-22 : Chlorodifluorométhane CHClF<sub>2</sub>

Le R22 est un hydrochlorofluorocarbure ou HCFC simple. C'est un puissant gaz à effet de serre (PRG 100 de 1700). Il est actuellement interdit dans les installations neuves par le protocole de Montréal, mais les installations existantes pourront utiliser du R-22 recyclé jusqu'en 2014. Ce fluide est peu odorant, incolore sous ses formes gazeuses et liquides, et il n'est ni toxique, ni irritant, ni inflammable, ni corrosif. Il est chimiquement stable.

Il est utilisé dans les installations de conditionnement d'air fermées lorsque la taille et le coût sont des facteurs importants, ou dans les applications de réfrigération à basse et moyenne température.

### R-123 : Dichlorotrifluoroéthane CHCl<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>

Il s'agit d'un liquide synthétique, non combustible et volatil, principalement utilisé comme fluide réfrigérant dans les installations de conditionnement d'air industrielles et commerciales. Le R-123 est actuellement utilisé comme solution de remplacement transitoire des chlorofluorocarbures et bromofluorocarbures, en cours de retrait selon le Protocole de Montréal. L'amendement de Copenhague de 1992 impose le retrait du R-123 et des autres hydrofluorocarbures avant 2020.

### R-134a

Le R-134a est un composé hydrocarbure partiellement fluoré (HFC). Il ne contient pas de chlore, n'a pas d'effet nocif sur la couche d'ozone, mais est en revanche un très puissant gaz à effet de serre. Ses applications se situent dans l'industrie automobile, les climatiseurs fixes et les systèmes de réfrigération à température moyenne.

### R-407C

Le R-407C est un mélange de trois hydrofluorocarbures, ou HFC, à savoir 23% de R-32, 25% de R-125 et 52% de R-134a. Le R-407C s'est établi comme une alternative en drop-in pour le HCFC (R-22) dans l'industrie. Néanmoins, quand un système est chargé avec un tel mélange zéotropique, des difficultés apparaissent sur les évolutions de températures aux états diphasiques et sur les différences de solubilité dans les huiles.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu des différentes utilisations de ces fluides fluorés :

| Compresseur  | Plage typique de puissance | Fluides fluorés utilisables |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| À piston     | 1 à 400 kWel               | HFC R-407C                  |
| À vis        | 100 à 1000 kWel            | HFC R-407C<br>HFC R-134a    |
| À spirales   | 5 à 100 kWel               | HFC R-407C<br>HFC R-134a    |
| Turbine Plus | 300 kWel                   | HFC R-134a<br>HCFC R-123    |

### Nouvelles molécules de synthèse à faible PRG

La possibilité de trouver de nouveaux HFC semble faible car les combinaisons de substitution d'atomes de fluor par de l'hydrogène sont limitées. C'est pourquoi, les investigations ne se restreignent plus à l'étude des HFC et à leurs mélanges.

Dorénavant, elles s'élargissent vers d'autres familles telles que les hydrofluoroéthers (HFE), les hydrofluoroléfinés (HFO), les alcools, les amines...

L'évaluation complète d'une nouvelle molécule est longue et fastidieuse car elle comprend la recherche de voies de synthèse économiquement et environnementalement viables, l'évaluation des performances énergétiques mais aussi la toxicité, l'inflammabilité et beaucoup d'autres aspects d'ordre technologique.

### Les fluides naturels

Les hydrocarbures (HC) et l'ammoniac partagent une problématique similaire quant à leur utilisation. Les HC sont inflammables tout comme le NH<sub>3</sub>, mais ce dernier est surtout toxique. Ces caractéristiques entraînent des mesures de sécurité toutes particulières pour leur usage.

Rationnellement, ils peuvent être utilisés comme réfrigérants dans deux types d'application :

- Dans les applications industrielles où l'utilisation de tels fluides est acceptable du point de vue de la sécurité et n'implique pas de surcoût important.
- Dans les utilisations où les charges de fluide frigorigène sont très faibles.

En dehors de ces deux cas, une option pour les fluides dangereux est le développement de systèmes indirects où le système frigorifique est confiné dans des locaux techniques appropriés avec transfert de la fraîcheur vers l'utilisation (milieu à refroidir) par un circuit secondaire à caloporteur (par ex. eau glacée ou CO<sub>2</sub>).

Comme leur charge est limitée selon l'utilisation par la norme NBN EN 378-1, la maximisation de leur production frigorifique spécifique (kWfroid.kg-1) est un enjeu de leur développement.

Dans tous les cas, le surcoût pour une utilisation sûre des fluides frigorigènes inflammables ou toxiques doit rester limité tant qu'ils sont en concurrence ouverte avec les HFC.

## R-717 : Ammoniac NH<sub>3</sub>

Les phases liquides et gazeuses sont toutes deux incolores. Son odeur est extrêmement âcre et agressive. L'ammoniac brûle lorsqu'on le chauffe, et peut exploser aux températures élevées. En phase gazeuse, l'ammoniac est deux fois plus léger que l'air. Le principal inconvénient de l'ammoniac consiste en des exigences de sécurité élevées à cause de sa toxicité aiguë et, dans un degré moindre, de son inflammabilité.

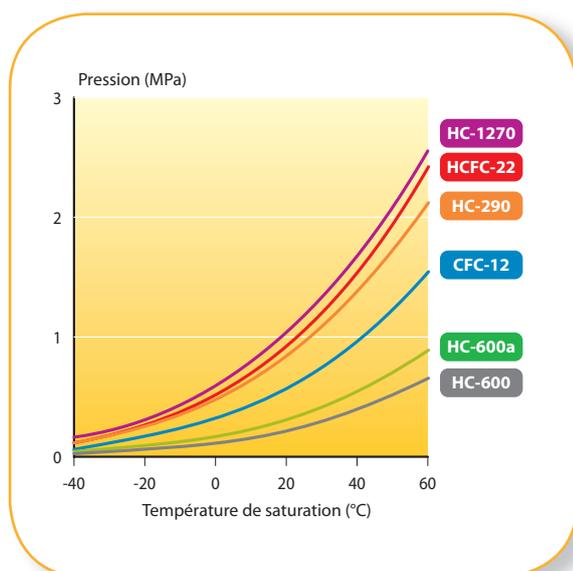
L'ammoniac est utilisé comme réfrigérant dans les grandes installations industrielles : l'emploi de ce fluide pour les systèmes de réfrigération de fortes puissances n'est plus à démontrer, notamment dans le secteur agroalimentaire. Bien que toxique, ce fluide est accepté dans les systèmes industriels car le personnel est prévenu et entraîné pour éviter les effets de panique.

En revanche, l'enjeu actuel pour l'ammoniac est d'investir le marché de la petite puissance (< 10 kW). L'absence de matériels dans cette gamme de puissance, notamment de compresseurs hermétiques ou semi-hermétiques, entrave le développement du NH<sub>3</sub> pour ce type d'application.

## Hydrocarbures

Afin de minimiser les risques d'inflammation, les charges doivent être confinées et les taux de fuite latente maîtrisés. Dans ce cas, les HC s'avèrent potentiellement être d'excellents fluides frigorigènes. Leurs températures critiques élevées et leurs températures d'ébullition suffisamment basses, sont idéales pour des systèmes de réfrigération ou de conditionnement d'air.

|                    |                                       |   |                                       |  |
|--------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Fluide frigorigène | HC-290                                | HC-1270 (ou: R -170)                    | HC-600                                | HC-600a                                  |
| Formule chimique   | Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | Propylène C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | Isobutane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |
| Tcritique °C       | 96,7                                  | 92,4                                    | 152,0                                 | 134,7                                    |
| Tébullition °C     | -42,1                                 | -47,7                                   | -0,6                                  | -11,7                                    |



Les limites d'inflammabilité et pratiques des 4 HC présentés sont similaires. En revanche, l'analyse des températures d'ébullition prédestine le propane (HC-290) et le propylène (HC-1270) aux applications de réfrigération et le butane (HC-600) et l'isobutane (HC-600a) au conditionnement d'air.

Comme les courbes pression/température à saturation sont différentes, l'association de deux HC permet d'obtenir un profil de courbe de saturation vapeur souhaité. Par exemple, le profil du CFC-12 (désormais interdit) peut être obtenu par un mélange à base de HC-290 (ou HC-1270) et d'HC-600a (ou HC-600).

Courbes de pression/température d'hydrocarbures.  
Source : Cyril Toublanc, 2010

## R-718 : Eau H2O

L'absence de risques liés à la toxicité ou l'inflammabilité font de l'eau le fluide naturel le plus respectueux de l'environnement. De plus, il est bon marché !

D'un point de vue technologique, il présente certains inconvénients :

- Température de point triple élevée (0 °C)
- Température d'ébullition élevée (100 °C).

Les applications en réfrigération industrielle et commerciale sont exclues, seuls la climatisation et le rafraîchissement sont possibles.

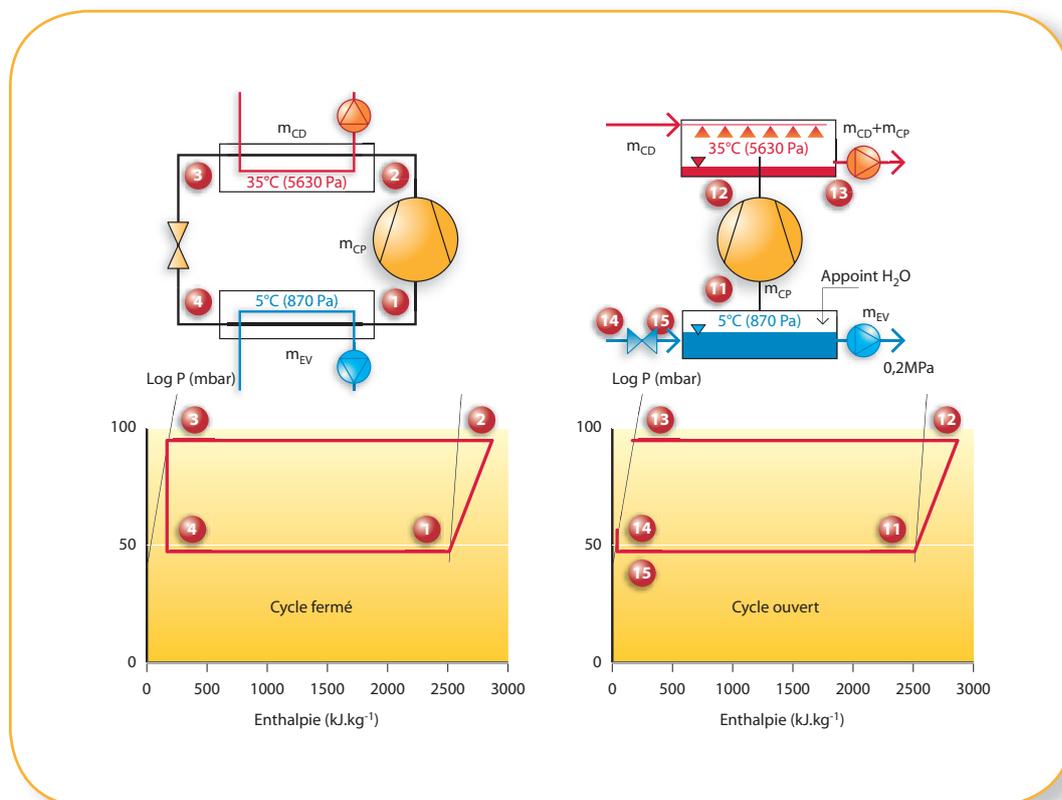
La notion d'étanchéité est différente des autres fluides frigorigènes car les pressions en fonctionnement sont sub-atmosphériques (870 Pa à 5 °C).

Par contre, les taux de compression peuvent rapidement être très importants. Pour une machine fonctionnant entre 5 °C et 40 °C, le taux de compression est de 8,5 avec l'H2O, contre seulement 2,9 avec le HFC R-134a.

Sa très faible capacité frigorifique exclut l'utilisation de compresseur volumétrique au profit de compresseur cinétique.

Dès lors que la température d'évaporation est supérieure à 35 °C, les performances théoriques des cycles frigorifiques à l'H2O sont supérieures à celles des fluides suivants : R-717, HC-290, HFC R-134a, CFC R-12, HCFC R-22, et HFC R-152a.

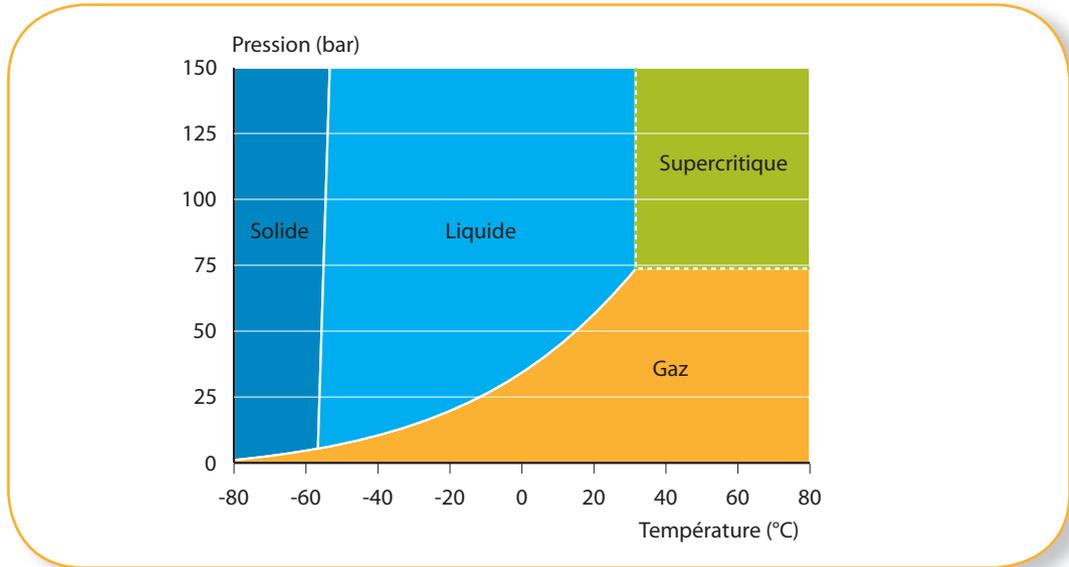
Le gain croît au fur et à mesure que le rendement du compresseur augmente. Pour les groupes refroidisseurs, on peut utiliser des condenseurs et évaporateurs à surface d'échange direct où l'eau est à la fois le fluide frigorigène et le fluide frigoporteur : l'absence d'échangeurs permet alors de diminuer la différence de pression au compresseur et d'augmenter les performances énergétiques.



Cycles de compression de l'eau, fermé (gauche) et ouvert (droite) - Source : Cyril TOUBLANC, 2010

## R-744 : Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>

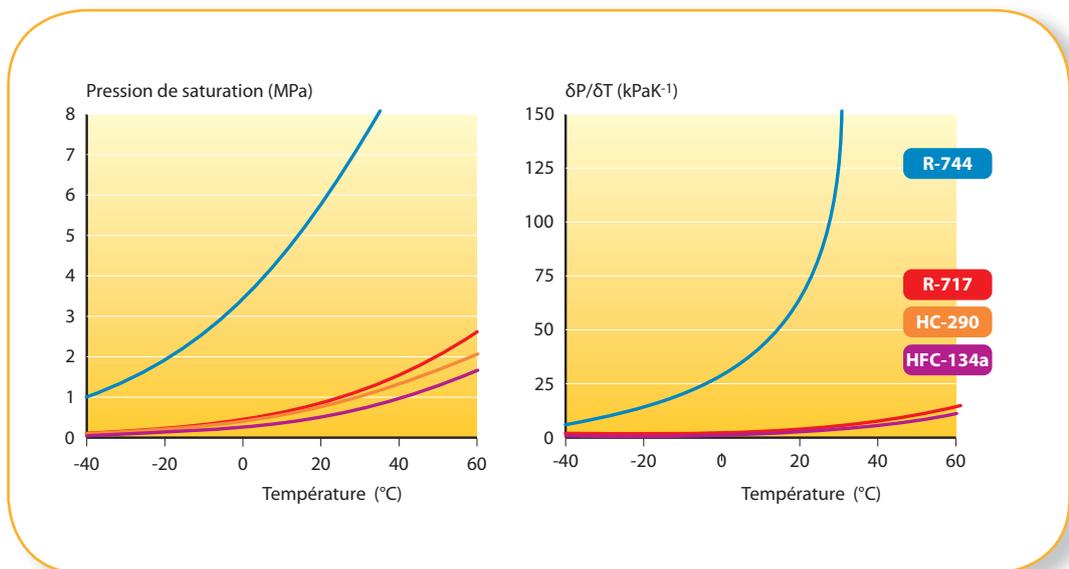
La pression et la température du point triple du CO<sub>2</sub> est de (0,52 MPa / -56,6 °C), et celles de son point critique est de (7,38 MPa / 31,1 °C). Cette plage de changement de phase par ébullition (ou condensation) lui confère la possibilité de couvrir très largement les principales applications de réfrigération et de chauffage.



Diagrammes de phase du CO<sub>2</sub>. Source : Cyril TOUBLANC, 2010

Le dioxyde de carbone a donc un point critique bas et des pressions élevées. Ces particularités font que les propriétés du dioxyde de carbone et l'approche dans l'exploitation des systèmes sont différentes de celles des fluides frigorigènes usuellement utilisés.

En dessous du point critique, les pressions à saturation et leur inclinaison en fonction de la température sont nettement plus élevées qu'avec d'autres fluides frigorigènes. Cela signifie que le glissement de température associé à une chute de pression est faible. Par conséquent, des écoulements à vitesses massiques plus élevées sont possibles, améliorant les échanges thermiques tout en ayant une très faible influence sur la surconsommation du compresseur.



Pression à saturation et  $\delta P / \delta T$  en fonction de la température. Source : Cyril TOUBLANC, 2010

Le CO<sub>2</sub> présente d'excellents coefficients d'échanges. La grande pression de travail du CO<sub>2</sub> a comme effet une plus grande capacité thermique volumique, ce qui permet la construction d'appareils plus compacts. Il a aussi certains autres avantages physiques, comme une faible tension superficielle, et une faible viscosité de ses vapeurs qui permet de diminuer le travail de pompage. Les taux de compression sont faibles par rapport aux autres réfrigérants (COP intéressant).

C'est pour ces raisons et dans un contexte environnemental et technologique propice que Lorentzen (1994) a donné une seconde vie au CO<sub>2</sub> comme fluide frigorigène plus d'un demi-siècle après son abandon. Le rôle des composants technologiques est prépondérant pour les performances du dioxyde de carbone. Le problème du confinement des gaz sous haute pression semble partiellement résolu, grâce à la maîtrise de la climatisation dans les véhicules.

Les applications potentielles du CO<sub>2</sub> sont multiples. Il y a des applications pour lesquelles le CO<sub>2</sub> s'impose naturellement, et d'autres pour lesquelles il faut apporter des améliorations aux systèmes l'utilisant pour qu'ils soient intéressants.

Pour des applications de chauffage d'eau chaude sanitaire ou conditionnement d'air, le CO<sub>2</sub> arrive à des pressions élevées (p ex. 74 bar à 31°).

Son point triple permet au CO<sub>2</sub> d'être potentiellement utilisé dans les applications de froid commercial, car ses pressions de fonctionnement sont alors compatibles avec la plupart des échangeurs commerciaux (1,1 MPa à -37 °C). Il peut être utilisé indifféremment :

- comme fluide secondaire ;
- dans un des deux étages d'une cascade (selon des besoins éventuels en ECS ou en chauffage : dans le cas où l'on considère qu'il faut combiner le besoin de chaleur à haute température (80-90°C) avec celui de froid et ce afin d'éviter de choisir une chaudière et un groupe de réfrigération pour la partie froid alimentaire, une installation de pompe à chaleur au CO<sub>2</sub> peut être intéressante) ;
- dans des cycles bi-étagés transcritiques.

Du côté de l'étage haute-température des installations cascade de froid commercial et industriel, on retrouve des fluides tels que le HFC R-404A, HFC R-134a, le Propane, le CO<sub>2</sub> mais plus généralement l'ammoniac. Côté basse-température, le CO<sub>2</sub> supplante progressivement l'ammoniac car cela évite d'avoir des composants volumineux du fait de l'importante masse volumique des vapeurs de l'ammoniac. Enfin, il est possible de s'affranchir de l'échangeur de couplage entre les circuits de production et de distribution, ce qui élimine un pincement de température supplémentaire.

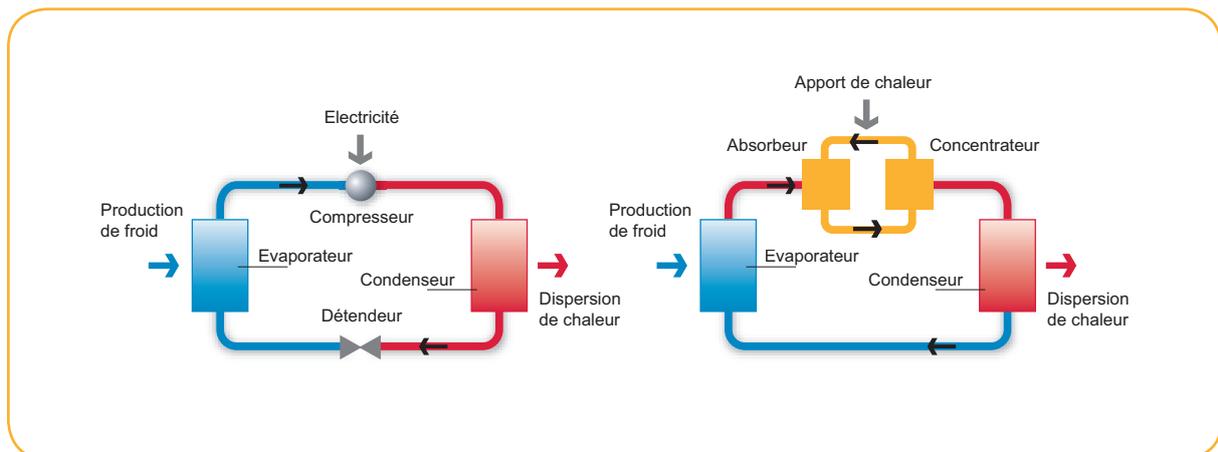
Les systèmes secondaires utilisant de l'ammoniac ou du propane avec de la saumure grèvent les coûts d'investissement initiaux (augmentation de 15 - 35 %) et augmentent la consommation d'énergie de fonctionnement (augmentation de 5 - 20 %) par rapport à un système direct. En revanche, le système en cascade HFC R-404A / CO<sub>2</sub> a une consommation énergétique et des coûts d'investissement presque identiques au HFC-404A en détente directe. Cette approche permet de réduire la charge du système HFC R-404A et les fuites latentes.

Dans le domaine supercritique, les propriétés du CO<sub>2</sub> subissent de très fortes variations sans qu'il y ait de changement de phase. Contrairement aux fluides frigorigènes «classiques», le rejet de chaleur à des températures supérieures à la température critique (31,1 °C) s'effectue dans un refroidisseur de gaz, en lieu et place du condenseur habituel. Le cycle est alors transcritique, c'est à dire que la basse pression est sous-critique alors que la haute pression est supercritique. La particularité de cette région supercritique, hormis les fortes variations des propriétés, est que la température n'est plus couplée à la pression. La haute pression du cycle transcritique n'est plus imposée et une recherche de sa valeur optimale est nécessaire.

## AB/ADsorption : faire du froid avec du chaud

La différence avec une machine traditionnelle à compression de vapeur réside dans :

- Le moyen de comprimer le fluide,
- mécanique dans le cas d'une machine traditionnelle,
- thermochimique dans le cas de la machine à sorption.
- Le type d'énergie nécessaire à cette compression
- électrique dans le cas d'une machine traditionnelle,
- calorifique dans le cas de la machine à sorption.



Source : CD Rom Energie +, version 6

## Principe de la machine à ab/adsorption

Le principe consiste à pulvériser de l'eau en fines gouttelettes dans un récipient sous vide. Du fait de la basse pression, l'eau s'évapore. Pour cela elle a besoin d'une certaine quantité de chaleur qui est extraite de l'eau à rafraîchir, circulant dans un circuit à travers le récipient.

Mais ce système ne peut fonctionner très longtemps : rapidement, le récipient sous vide sera saturé de vapeur d'eau, et l'eau dispersée ne s'évaporerait plus. Il faut donc un moyen pour maintenir ou recréer le vide dans le récipient !

C'est là qu'intervient le sorbant. C'est soit un liquide, on parle alors d'absorbant, ou un solide poreux, on parle alors d'adsorbant. Il «boit» la vapeur d'eau contenue dans l'ambiance, et la retient. Au fur et à mesure qu'il ab/adsorbe de la vapeur, sa capacité d'ab/adsorption diminue jusqu'à être nulle, à saturation. Le sorbant est alors chauffé à une certaine température et «rend» la vapeur d'eau. Il récupère alors toutes ses propriétés d'ab/adsorption.

Exemple d'absorbant :

Dans les machines frigorifiques à absorption utilisées en climatisation, la substance absorbante est généralement le bromure de lithium (LiBr), le fluide réfrigérant, de l'eau. Ce type de machine permet de refroidir de l'eau jusqu'à environ 5°C. La température de l'eau utilisée pour la régénération de l'absorbant doit être comprise entre 80 et 120°C.

Exemple d'adsorbant :

Le gel de silicium couplé avec de l'eau comme fluide réfrigérant. La température de l'eau utilisée pour la régénération de l'adsorbant doit être comprise entre 65 à 80 °C. Cette température plus basse est un avantage par rapport à la machine à absorption.

| Comparaison de 2 systèmes à absorption | LiBr - H <sub>2</sub> O                              | H <sub>2</sub> O – NH <sub>3</sub> |
|--|--|------------------------------------|
| Substance absorbante                   | LiBr   | H <sub>2</sub> O                   |
| Réfrigérant                            | H <sub>2</sub> O (R-718)                             | NH <sub>3</sub> (R-717)            |
| T° d'utilisation                       | T <sub>f</sub> > 5°C                                 | -50°C < T <sub>f</sub> < 0°C       |
| COP <sub>froid</sub>                   | 0,65 < COP <sub>froid</sub> < 1,2                    | 0,5 < COP <sub>froid</sub> < 0,7   |
| Types d'utilisation                    | Rafraîchissement des locaux et conditionnement d'air | Froid commercial et industriel     |
| Capacité                               | 10 kW à 6 MW   | 10 kW à 6 MW                       |
| T° seuil pour la régénération          | 80°C   | 120°C                              |

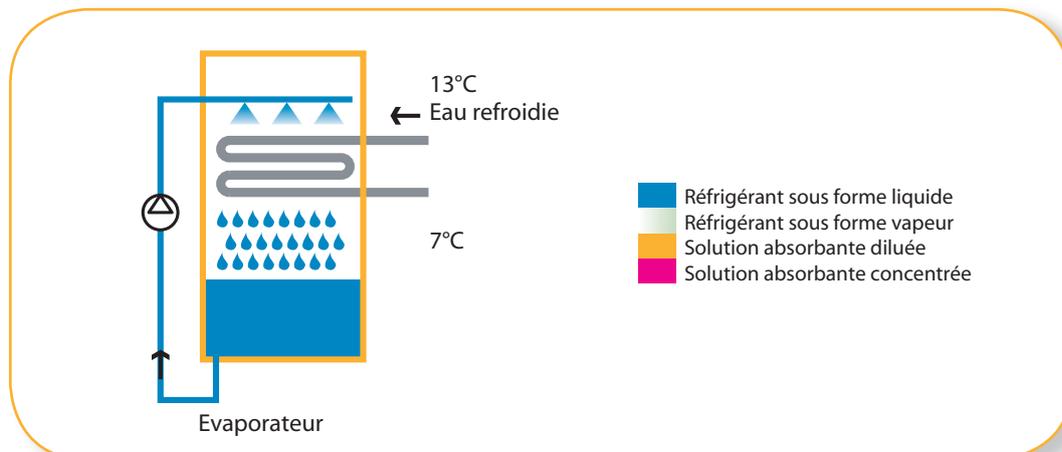
Source : Marc FRERE – Michel HUART

## Fonctionnement de la machine à ab/adsorption

La machine frigorifique à absorption se divise en quatre composants principaux : l'évaporateur, l'absorbeur, le concentrateur et le condenseur.

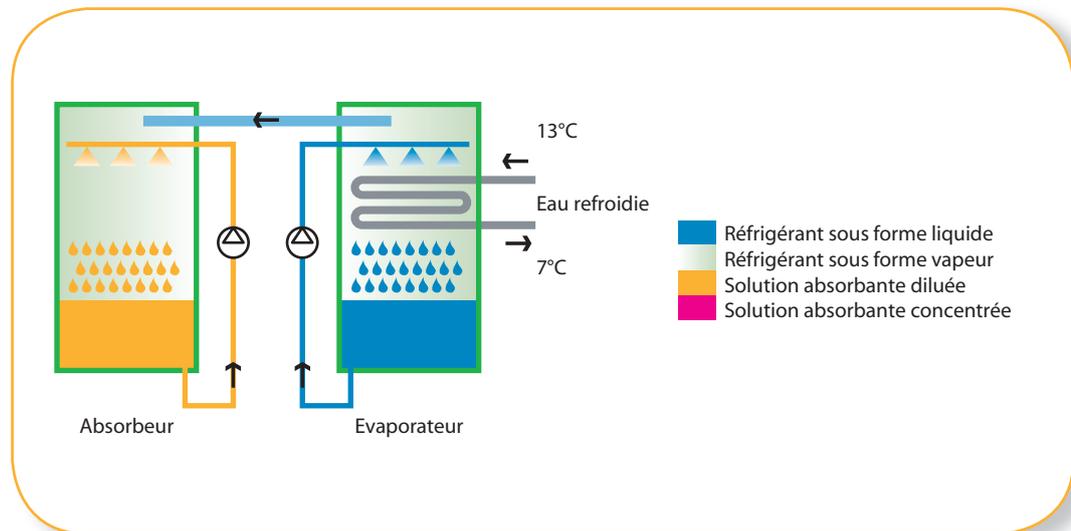
Dans l'évaporateur, le réfrigérant (ici de l'eau) est pulvérisé dans une ambiance à très faible pression. L'évaporateur est parcouru par un circuit à eau. En s'évaporant, le réfrigérant soustrait sa chaleur à cette eau qui est ainsi refroidie.

Une partie du réfrigérant pulvérisé ne s'évapore pas et tombe dans le fond de l'évaporateur où elle est pompée pour être à nouveau pulvérisée.



Source : CD Rom Energie +, version 6

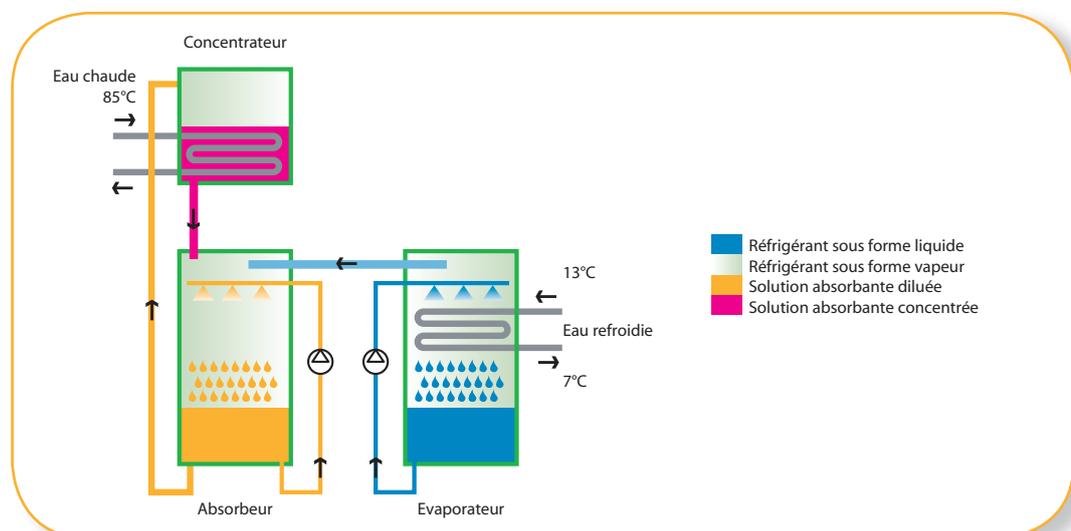
La vapeur d'eau créée dans l'évaporateur est amenée à l'absorbeur. Il contient la solution absorbante (LiBr) qui est continuellement pompée dans le fond du récipient pour y être pulvérisée. Le LiBr absorbe la vapeur d'eau hors de l'évaporateur et y maintient ainsi la basse pression nécessaire à la vaporisation du réfrigérant.



Source : CD Rom Energie +, version 6

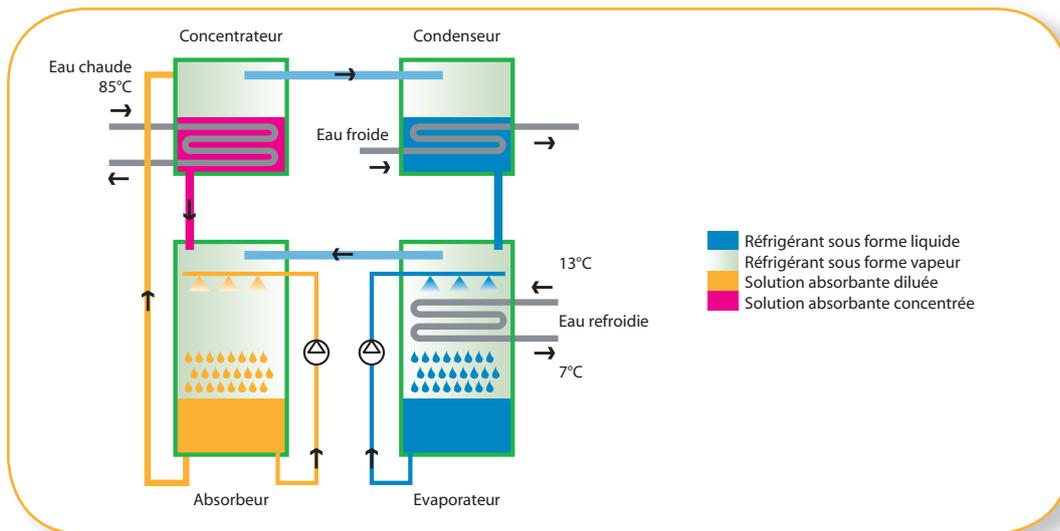
Au fur et à mesure qu'elle absorbe la vapeur d'eau, la solution absorbante est de plus en plus diluée. Elle finirait par être saturée et ne plus rien pouvoir absorber.

La solution est donc régénérée dans le concentrateur. Elle est réchauffée, par une batterie à eau chaude (environ 85°C) et une partie de l'eau s'évapore. La solution régénérée retourne à l'absorbeur.



Source : CD Rom Energie +, version 6

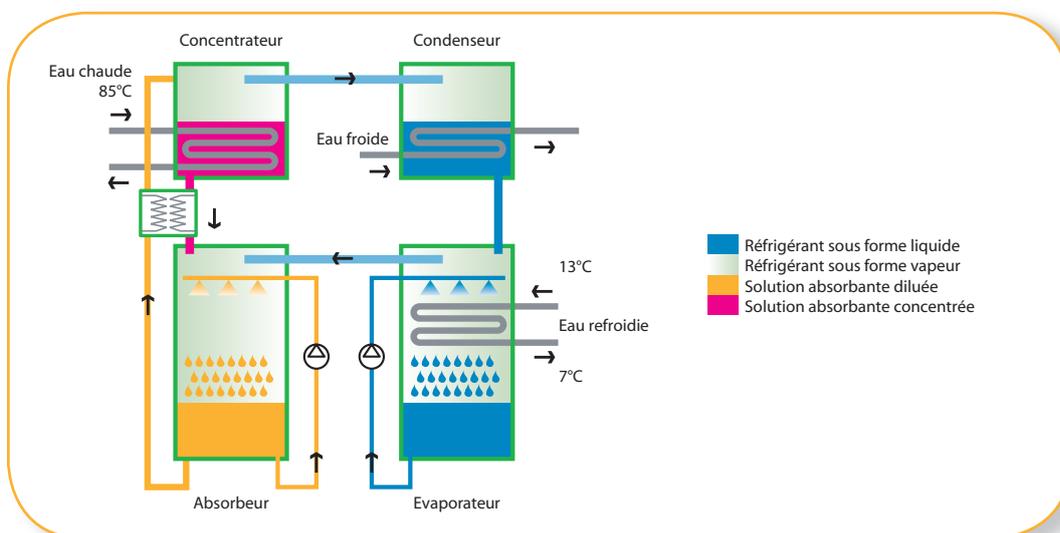
Enfin, la vapeur d'eau extraite du concentrateur est amenée dans le condenseur, où elle est refroidie par une circulation d'eau froide. L'eau condensée retourne à l'évaporateur.



Source : CD Rom Energie +, version 6

Deux compléments au système augmentent son efficacité :

- Une circulation d'eau froide dans l'absorbeur. Le phénomène d'absorption génère de la chaleur. La circulation d'eau froide dans le fluide absorbant évite une montée en température qui diminuerait son efficacité. (Remarque : l'eau de refroidissement de l'absorbeur peut ensuite passer dans la batterie de refroidissement du condenseur).
- Un échangeur de chaleur sur le circuit du fluide absorbant. Le fluide chaud sortant du concentrateur qui retourne à l'absorbeur préchauffe le fluide qui va vers le concentrateur, économisant ainsi une partie de l'énergie nécessaire pour chauffer le fluide à régénérer.



Source : CD Rom Energie +, version 6

Dans une machine frigorifique à adsorption, l'adsorbant est solide et il est donc impossible de l'amener au fur et à mesure vers la source de chaleur pour être régénéré.

La machine fonctionne donc de manière cyclique. Deux récipients servent, tour à tour, d'adsorbant et de désorbant. Dans la première période, le premier adsorbant est utilisé pour la production de froid, tandis que l'autre est parcouru par l'eau chaude, et ainsi régénéré. Dans la seconde période, lorsque le premier adsorbant est saturé, il est remplacé par le second pour la production de froid, et est alors lui-même régénéré.

## Bilan d'énergie et efficacité énergétique d'un système de réfrigération à ab/adsorption

Nous avons vu plus haut que dans le cas d'une machine frigorifique à compression de vapeur, la puissance fournie est électrique. Le COP<sub>froid</sub> d'une telle machine peut atteindre la valeur de 3, voire plus.

Dans le cas d'une machine frigorifique à absorption, le COP<sub>froid</sub> réel tourne autour de 0,7. Celui d'une machine à adsorption varie entre 0,5 et 0,6.

Quel est alors l'intérêt d'une telle machine ?

Un premier avantage réside dans l'absence de compresseur mécanique, donc de vibrations et de bruits. Ces machines demandent donc un entretien limité et présentent une grande longévité.

Le second avantage vient de la possibilité de valoriser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique d'un compresseur. Ce type de machine est surtout intéressante dans le secteur industriel parce que certains process libèrent une chaleur importante dont il est possible de tirer une puissance frigorifique utile par ailleurs.

L'énergie calorifique peut provenir :

- d'une chaleur process ;
- de la chaleur issue d'un cogénérateur (on parle alors de trigénération : utilisation de la chaleur de la cogénération disponible pour produire du froid lorsque la chaleur ne peut être valorisée);
- de la chaleur solaire.

La rentabilité d'un système de trigénération est difficile à évaluer, car elle dépend de nombreuses valeurs de rendement :

- rendement moyen de la production électrique en centrale,
- COP<sub>froid</sub> de la machine frigorifique à compression,
- rendement de la cogénération,
- COP<sub>froid</sub> de la machine frigorifique à sorption.

L'intérêt du refroidissement solaire réside dans la simultanéité de la demande de froid et de l'ensoleillement. Lorsque la chaleur nécessaire au fonctionnement de la machine frigo est fournie par le soleil, le froid fourni est « gratuit » (pas de coût de fonctionnement, pas de pollution).

Cependant, pour fonctionner, la machine frigo à absorption demande une température d'eau minimale qui se situe entre 70 et 95°C en fonction du couple solvant-réfrigérant. Pour atteindre cette température, l'emploi de capteurs performants est indispensable (sélectifs, sous vide, à faible concentration), ce qui induit un coût d'investissement assez important. De plus, lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant pour fournir de l'eau à température adéquate, une autre source de chaleur (d'appoint ou de substitution) doit permettre le fonctionnement du système. Des solutions de stockage peuvent résoudre le problème à certaines périodes, mais il reste toujours un certain nombre d'heures de fonctionnement où la chaleur doit être produite par du gaz ou du fuel. Pendant ces heures, le rendement du système est faible comparé au système classique de la machine frigorifique à compression.

L'intérêt de la machine frigorifique à absorption couplée avec des capteurs solaires doit donc être évalué sur base d'une moyenne annuelle, en tenant compte des heures d'ensoleillement exploitables.

Source : Yasaki.





Trigénération. Source : gbca.org.

Cette évaluation dépend de nombreuses valeurs à estimer :

- rendement de la chaudière,
- rendement de la machine frigorifique à absorption,
- proportion de la demande de froid qu'on peut produire avec l'énergie solaire, qui dépend du nombre d'heures d'ensoleillement exploitables,
- rendement moyen de la production électrique en centrale,
- COPfroid de la machine frigorifique à compression.

Sous notre climat, un tel système pourrait être envisagé pour un bâtiment dont la demande de froid est limitée aux mois d'été grâce à une conception adéquate (protections solaires, valorisation de l'inertie thermique, free cooling ou free chilling,...), mais difficilement pour un bâtiment dont la demande de froid proviendrait principalement des charges internes car la demande ne pourrait alors certainement pas être rencontrée par l'ensoleillement plus de la moitié du temps.

Un refroidissement par de la chaleur process peut être très intéressant, surtout si la chaleur process perdue est assez constante et les besoins en froid également.

Il faut vous adresser à un bureau d'études spécialisé pour examiner la rentabilité d'un projet de système frigorifique à sorption dans vos installations.

La réfrigération magnétique fait l'objet de travaux de recherche et développement. Elle est basée sur l'effet magnéto-calorique (EMC), une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques qui se traduit par un échauffement ou un refroidissement du matériau lorsqu'il est aimanté ou désaimanté de manière adiabatique. On peut ainsi réaliser magnétiquement l'équivalent du cycle d'une machine thermique classique d'autant plus que certains matériaux possèdent un « EMC géant » autour de la température ambiante.

Les seuls corps purs qui présentent un saut de température suffisant pour pouvoir être exploités dans le domaine du froid magnétique, sont le gadolinium (rare et cher) et l'arsenic (particulièrement toxique). La mise au point récente d'alliages à base de cobalt, manganèse, silicium et germanium ou de céramiques présentant des propriétés analogues rendent envisageable la réalisation et la commercialisation à destination du marché grand public de réfrigérateurs magnétiques.

Actuellement, le principal obstacle à une industrialisation est le champ magnétique particulièrement élevé (de l'ordre de 5 teslas) qu'il faut générer pour pouvoir obtenir des rendements intéressants.



Free-cooling.  
Source : Aquaciat.

### Le free cooling

Le free cooling n'est pas à proprement parler un système de production de froid.

Le free cooling est la capacité de pouvoir faire du froid à faibles coûts, en se servant des équipements d'une installation de froid traditionnelle et des éléments naturels (air et/ou eau). Il peut être utilisé aussi bien dans le rafraîchissement des bâtiments qu'en process industriel.

Le free cooling consomme très peu d'énergie (une pompe et / ou un ventilateur) par rapport à la production de froid par compression mécanique. Il utilise souvent des aéroréfrigérants secs (dry coolers). Il peut être utilisé seul (rarement), ou en pré-refroidissement avant une installation classique dont il permet de diminuer la puissance (par exemple, lorsque le produit à refroidir est chaud). Il peut arriver que l'installation de free cooling suffise au refroidissement en hiver (air ambiant froid) et que le couplage soit nécessaire pour les autres saisons. Le free cooling sera actif dès lors que les conditions climatiques seront favorables (températures extérieures peu élevées).

Dans les bâtiments, le free cooling consiste à emmagasiner la fraîcheur de la nuit pour rafraîchir pendant la journée par un système architectural de gestion des courants d'air.

Cette technique a des temps de retour excellents et doit être exploitée à chaque fois que possible.

### Le refroidissement adiabatique

Le refroidissement est obtenu grâce à l'évaporation de petites gouttes d'eau dans l'air. Comme il n'y a pas besoin de chaleur supplémentaire lors de l'évaporation de l'eau, cette technique s'appelle «refroidissement adiabatique». On utilise seulement de l'énergie (la chaleur) dans l'air pour l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une diminution de la température de l'air ambiant.

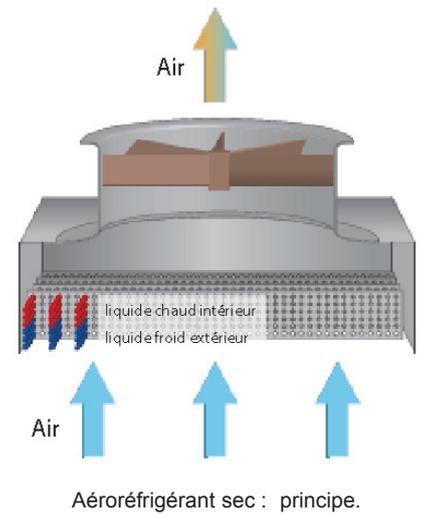
Du fait que l'eau n'est pas chère et ne présente aucune toxicité, on utilise souvent des systèmes ouverts. Le système le plus simple est ... la transpiration de la peau humaine.

### La légionellose

Pour tout système mettant en jeu de la dispersion d'eau (refroidissement adiabatique, tours de refroidissement), il faut être extrêmement attentif à maîtriser les risques de légionellose. Aussi connu comme « maladie du légionnaire », elle survient à la suite de l'inhalation de gouttelettes d'eau (5 à 10 micron) contaminées par la bactérie *legionella pneumophila* et peut entraîner la mort.

Le développement des légionelles dans les installations est favorisé par:

- Des températures entre 25 et 50 °C
- De l'eau stagnante et des bras morts
- Des dépôts, de la rouille et d'autres contaminations
- La présence de biofilm et d'autres micro-organismes
- Un manque de maintenance ou une maintenance non adaptée.



## Les aérateurs secs (dry coolers)

Les aérateurs secs sont conçus pour refroidir des liquides grâce à l'air ambiant. Un échangeur composé de tubes et d'ailettes de refroidissement est situé au centre de chaque segment de l'aérateur. Le liquide à refroidir circule dans les tubes, qui peuvent être disposés de différentes manières afin d'optimiser le nombre de passages et la perte de charge.

Les ailettes déterminent la zone d'échange de chaleur et créent les turbulences requises pour un transfert de chaleur efficace. Le passage de l'air de refroidissement est forcé par un ventilateur et rejeté à l'atmosphère. Les différents segments sont insérés dans un cadre support.

Les aérateurs secs sont très efficaces mais ne peuvent cependant pas faire baisser la température à un niveau plus bas que la température ambiante.

### Adiabatic boosters

Quand les aérateurs secs ne sont plus assez efficaces (par exemple à cause des températures élevées pendant l'été), des systèmes de refroidissement adiabatique peuvent fournir un refroidissement supplémentaire.



Aérateur à sec. Source : SEARLE

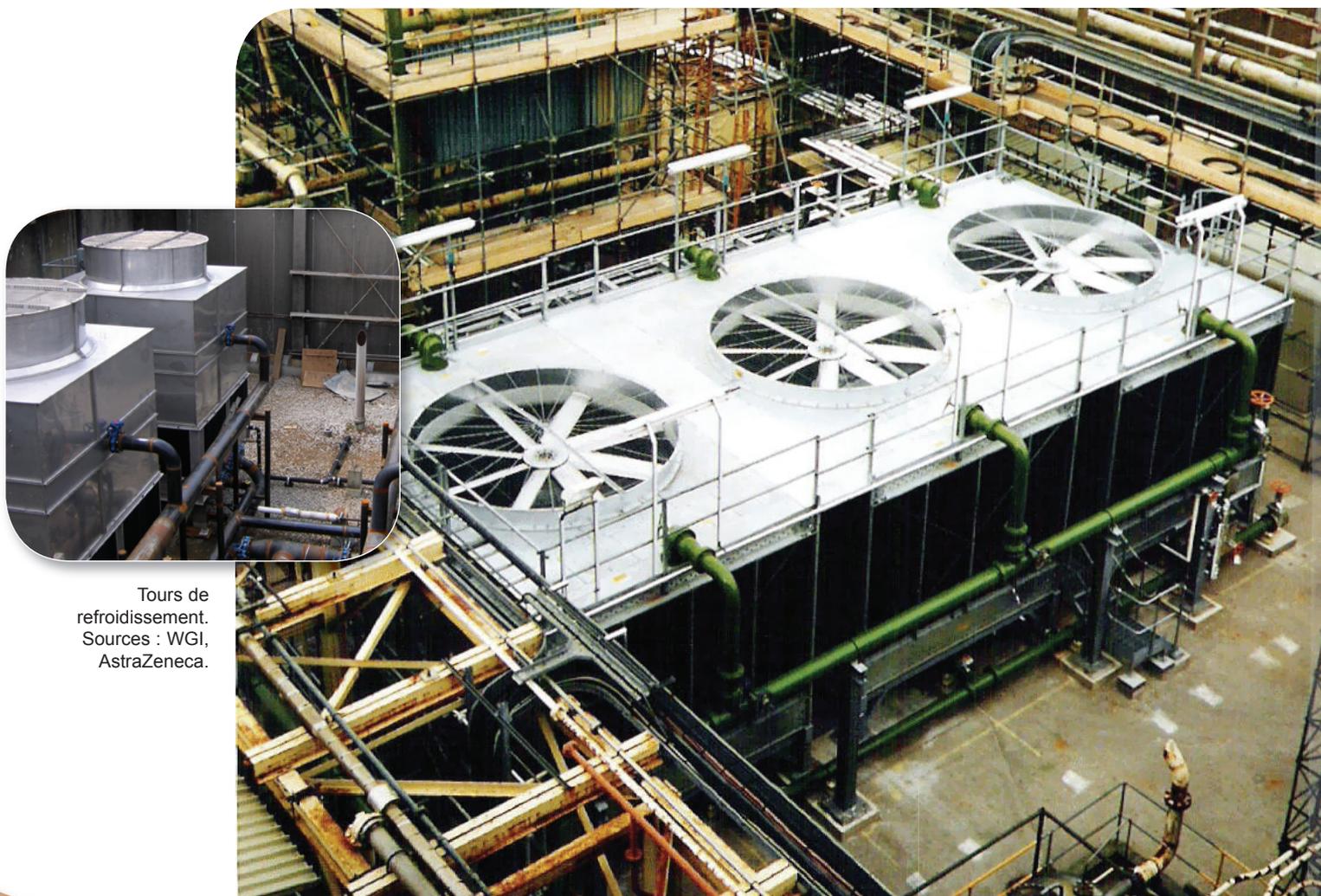
## Les tours de refroidissement (cooling towers)

Chaque fois que c'est applicable, les tours de refroidissement pour la dissipation de la chaleur devraient être préférées aux systèmes de réfrigération et de refroidissement utilisant un cycle frigorifique, car cela permet l'économie d'une quantité significative d'énergie.

Une tour de refroidissement est un échangeur par lequel on prélève de la chaleur de l'eau en mettant cette eau en contact direct avec de l'air. Le transfert de chaleur s'effectue partiellement par l'échange de chaleur entre l'air et l'eau, mais surtout par l'évaporation d'une petite quantité de l'eau à refroidir (qui provoque le panache de vapeur d'eau que l'on voit parfois au dessus d'une tour de refroidissement, fréquemment confondu avec des fumées de cheminée par des observateurs non avertis). De cette façon, on peut atteindre des températures de refroidissement inférieures à la température sèche ambiante. Cette possibilité de refroidir l'eau à une température plus basse que la température ambiante constitue un avantage important des tours par rapport aux aéroréfrigérants secs (dry coolers).

Les tours de refroidissement peuvent être catégorisées de différentes manières: sur base du type de ventilateur, de la forme de la tour, du débit, de la puissance, de la qualité de l'eau à refroidir, ... La classification d'une tour de refroidissement se fait souvent sur base des critères suivants:

- Tirage naturel ou forcé
- Air aspiré ou soufflé
- Circuit de refroidissement ouvert, fermé ou hybride. Le type de circuit de refroidissement est déterminant pour la façon exacte dont la transmission de chaleur se produit.



Tours de refroidissement.  
Sources : WGI,  
AstraZeneca.

### Tirage naturel ou forcé

Les tours de refroidissement à tirage naturel utilisent une cheminée pour produire le mouvement de l'air. Le courant d'air résulte de la différence de température entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la tour de refroidissement.

Dans le cas du tirage forcé c'est un ventilateur qui met l'air en mouvement.

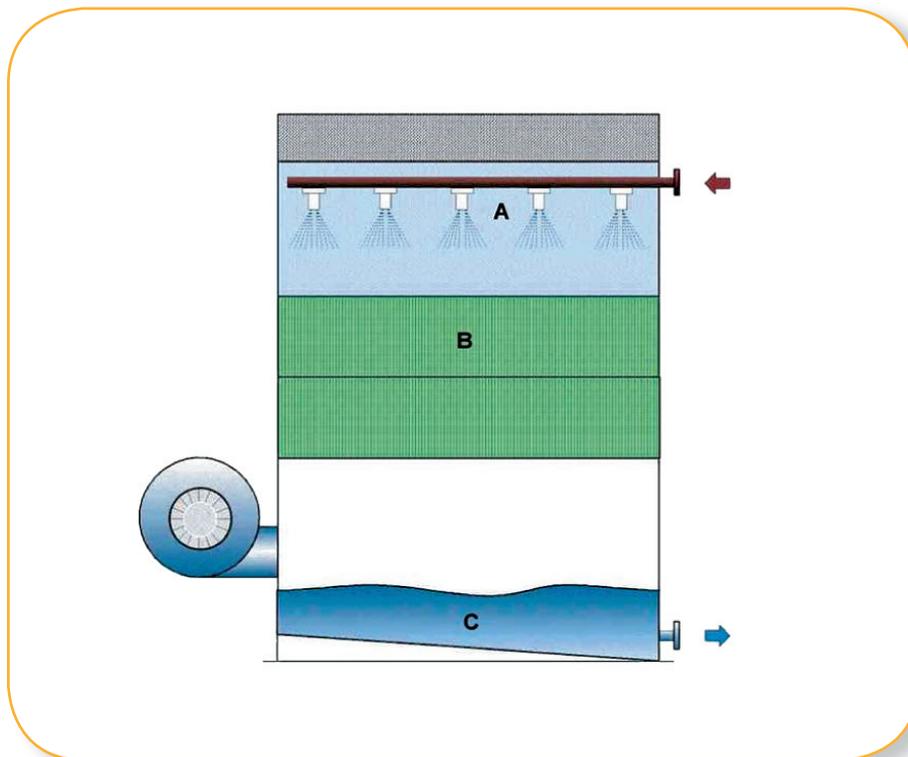
### Air aspiré ou soufflé

Certaines tours utilisent un ventilateur aspirant installé au-dessus de la tour de refroidissement. On utilisera toujours un ventilateur axial pour cette application.

On peut aussi utiliser un ventilateur soufflant. Dans ce cas le ventilateur est installé dans la partie basse de la tour de refroidissement et on peut utiliser aussi bien un ventilateur axial que centrifuge.

### Circuit ouvert, fermé ou hybride

Dans les tours de refroidissement à circuit ouvert, l'air et l'eau de process à refroidir entrent directement en contact.



Principe de refroidissement. Source : Almecc

Dans certains cas, l'eau (ou un autre fluide) à refroidir ne peut pas entrer en contact direct avec l'air (par exemple dans l'industrie alimentaire). On peut alors se tourner vers les tours de refroidissement à circuit fermé, qui font appel à un échangeur de chaleur qui sépare le fluide à refroidir de l'eau évaporée dans la tour. Ainsi le fluide du process à refroidir n'entre pas en contact avec l'air.

#### CIRCUIT OUVERT

L'eau à refroidir est pompée vers le haut de la tour.

Les répartiteurs (A) distribuent l'eau sur les surfaces de ruissellement (B).

L'eau est diffusée en film mince et uniforme sur les corps de ruissellement assurant ainsi une très grande surface de contact entre l'air et l'eau (surface d'échange de chaleur).

Le ventilateur souffle ou aspire l'air ambiant au travers des surfaces de ruissellement. Cet air refroidit l'eau de 2 manières différentes. Une partie de la chaleur est prélevée par convection (le contact entre l'eau chaude et l'air plus froid) mais la plus grosse partie du transfert de chaleur résulte de l'évaporation.

L'air saturé d'humidité sort ensuite par la partie supérieure de la tour.

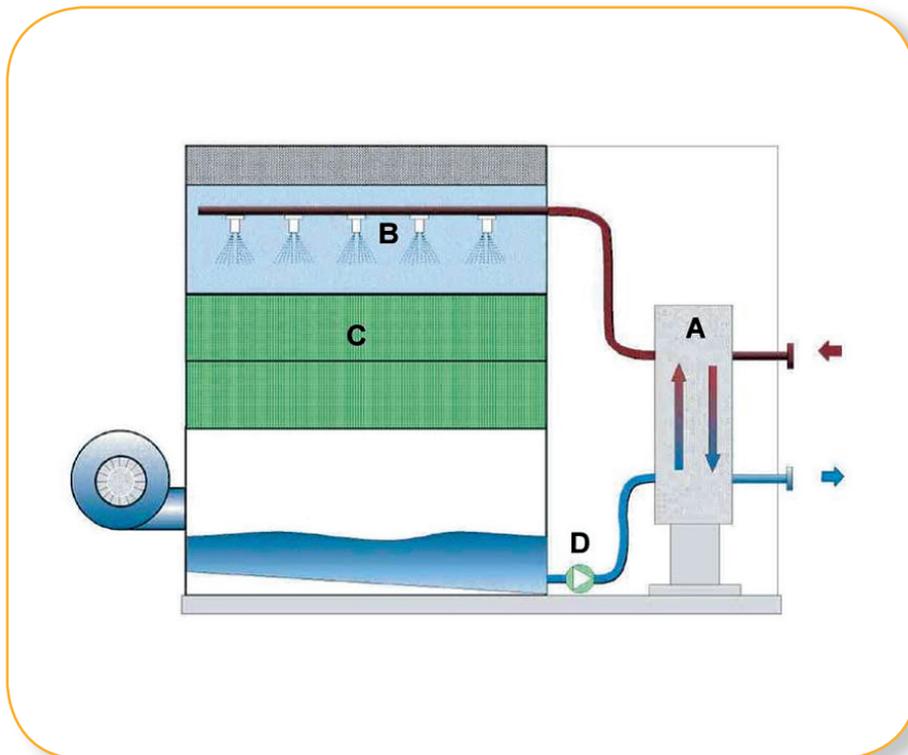
L'eau refroidie tombe dans le bassin (C) situé sous l'appareil et est remise en circulation dans le processus de production.

Les séparateurs de gouttelettes évitent que les gouttes d'eau quittent la tour de refroidissement.

## Circuit fermé

Côté process, le fluide à refroidir transite par l'échangeur à chaleur (A) (par exemple, un échangeur à plaques) qui se trouve à proximité de la tour de refroidissement. Dans l'échangeur de chaleur, la chaleur du fluide process à refroidir est échangée avec l'eau de refroidissement du côté tour.

Côté tour de refroidissement, l'eau de refroidissement réchauffée qui sort de l'échangeur est amenée par une tuyauterie au sommet de la tour. Le fonctionnement de la tour est le même que dans un circuit ouvert, et l'eau une fois refroidie est envoyée par la pompe de circulation (D) vers l'échangeur où elle va refroidir le fluide process.



Principe de refroidissement. Source : Almeco

Dans les tours hybrides (aussi bien pour les circuits ouverts que fermés), on combine un refroidissement sec (seulement par convection) et un refroidissement humide (par convection et évaporation) à l'intérieur d'un même appareil, en ajoutant une batterie de refroidissement air/eau (aéroréfrigérant sec) supplémentaire au-dessus de la tour de refroidissement. Le refroidissement sec partiel ou complet qui en résulte permet de fonctionner en économisant de l'eau. En effet, cette batterie permet, en fonction de la température extérieure et/ou de la puissance thermique à évacuer, d'utiliser l'aéroréfrigérant sec pour réaliser une partie du refroidissement et donc de réduire partiellement l'évaporation. En conséquence, des économies d'eau considérables peuvent être obtenues, tandis que la forte diminution du panache visible représente un atout supplémentaire. Plusieurs combinaisons et configurations sont possibles, chacune avec ses propres caractéristiques et avantages.

### J'ai une installation au HCFC, que dois-je faire ?

Son utilisation reste possible dans l'immédiat mais sera interdite à terme (2015) sous un fonctionnement aux HCFC.

Si votre installation est ancienne et doit être prochainement remplacée, elle peut être conservée en l'état jusqu'à la fin de sa durée de vie.

Si elle est récente, il faudra envisager sa modification ou son remplacement d'ici 2015.

#### Faire un état des lieux

Compte tenu des évolutions récentes de la situation, vous devez réunir un certain nombre d'informations qui vous permettront de préciser la démarche à adopter :

- Age et état de l'installation : portez une attention particulière à son confinement que l'on peut évaluer par les appoints effectués récemment.
- Evaluation des besoins actuels et futurs : température, puissance frigorifique, longévité.... Il peut être préférable de consulter un bureau d'études ou un fournisseur spécialisé pour vérifier ces points et faire établir un devis si des modifications s'avèrent nécessaires.

Si votre installation est récente, il faudra donc d'ici 2015 :

- soit garder la même installation en remplaçant le HCFC par un autre fluide frigorigène (HFC ou autres), compatible avec l'installation. Cette opération de reconversion nécessite un réglage et éventuellement le changement de certains composants pour que l'équipement puisse fonctionner ;
- soit investir dans une nouvelle installation fonctionnant avec un nouveau fluide de type HFC ou autres).

Utiliser les fluides de type HFC en remplacement du HCFC dans une installation existante n'implique que peu de remplacement de pièces (joints, garnitures et parfois l'huile du système). C'est donc probablement la solution la plus adaptée si le système frigorifique est récent, bien entretenu et si l'on peut se permettre une diminution de sa capacité frigorifique. Une étude préalable reste cependant nécessaire. De plus, elle est moins coûteuse que le remplacement complet du système frigorifique.

## POUR PLUS D'INFOS...

### Contacts/références :

En bref, toutes ces optimisations sont envisageables dans votre entreprise si vous disposez d'un groupe de froid.

Cette fiche vous donne une idée du potentiel d'optimisation mais l'étude et la mise en œuvre de ces mesures

doivent souvent être réalisées par des spécialistes. Ci-dessous donc une liste de contacts utiles :

- Spécialistes et fournisseurs équipements : Union belge des frigoristes (UBF). liste des membres classés par province : [http://www.ubf-aca.be/ubfaca/fr/leden\\_install\\_B\\_fr.htm](http://www.ubf-aca.be/ubfaca/fr/leden_install_B_fr.htm)
- Liste des bureaux d'audits agréés par la Région Wallonne sur <http://energie.wallonie.be>
- Primes de la Région Wallonne sur <http://energie.wallonie.be>
- Energy Pooling Wallonie : le réseau des conseillers Energie-Entreprises des Chambres de commerce et d'industrie : <http://www.energypooling.be>

### Principales références légales et normatives

- Norme NBN EN 378-1 : 2008, relative aux systèmes de réfrigération et pompes à chaleur
- Règlement CE n° 2037/2000 du Parlement européen et du Conseil du 29 juin 2000 (JOCE L 244 du 29 septembre 2000) relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, modifié par les règlements CE n°2038/2000 et 2039/2000 du 28 septembre 2000.
- Règlement CE N°842/2006 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 relatif à certains gaz à effet de serre fluorés (remarque : vise certains agents réfrigérants non repris dans le Règlement 2037/2000, à savoir les HFC et les PFC).
- Arrêté du Gouvernement wallon du 12 juillet 2007 tendant à prévenir la pollution lors de l'installation et la mise en service des équipements frigorifiques fixes contenant de l'agent réfrigérant fluoré ainsi qu'en cas d'intervention sur ces équipements, et à assurer la performance énergétique des systèmes de climatisation.
- Arrêté du Gouvernement wallon du 12 juillet 2007 déterminant les conditions intégrales et sectorielles relatives aux installations fixes de production de froid ou de chaleur mettant en œuvre un cycle frigorifique (remarque : seules les installations à cycle frigorifique à compression de vapeur de réfrigérants fluorés sont visées dans cet arrêté).
- Amendements proposés au Protocole de Montréal - UNEP/OzL.Pro.WG.1/29/8 du 4 mai 2009 - Groupe de travail à composition non limitée des Parties au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone- Vingtième réunion -Genève, 15-18 juillet 2009.

## Bibliographie :

Ont contribué à la rédaction de ce cahier technique toutes les entreprises citées en source photographique.

Cahier technique n°5 – La réfrigération - Economies d'énergie dans l'industrie alimentaire – octobre 2008

<http://www.energypooling.be/> → investissements économiseurs d'énergie

CD Rom Energie + , version 6: <http://energie.wallonie.be>

Historique de l'industrie frigorifique en Belgique – site internet ...

Tours de refroidissement – [www.almeco.eu](http://www.almeco.eu)

ADEME (2003), Entreprises : optimisez vos consommations énergétiques, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

ADEME (2010), Economies d'énergie: choisir la performance – optimiser l'existant, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

Froid et Environnement - ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture - Document réalisé en collaboration avec la profession du Froid - 27/09/2006

Le Programme européen - Motor Challenge Program - Module Systèmes Actifs de Réfrigération et de Rafraîchissement – Commission européenne – Direction générale Energie et Transport – 1er novembre 2006

Exposé présenté dans le cadre du cours ENER002 – FSA ULB – 06 Réfrigération solaire - Marc FRERE et Michel Huart - 2004

Amélioration du cycle frigorifique transcritique au CO2 par une compression refroidie : évaluations numérique et expérimentale - Thèse présentée devant le Conservatoire national des Arts et Métiers pour obtenir le grade de Docteur par Cyril Toublanc (Ingénieur CNAM) - Soutenue le 3 décembre 2009 – Version 1 – 22 mars 2010

2006 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee – UNEP

Les gaz fluorés : Vers une réduction accrue du réchauffement climatique- [www.fluorocarbons.com](http://www.fluorocarbons.com)

Les fluides réfrigérants et leur impact sur le climat- Félix Dalang – juillet 2010

ACTIONOZONE - L'heure d'éliminer les HCFC – Septembre 2008

MADEA : Réfrigération magnétique autour de la température ambiante – Grenoble INP - G2Elab

**ECONOTEC**  
CONSULTANTS



## COLOPHON

Opérateurs désignés par la Région wallonne :

**Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) asbl**

Boulevard Frère Orban 4, 5000 NAMUR

Contact : Stéphanie Marchandise, Responsable de Projets

Tél. : 081 25 04 80 — Fax : 081 25 04 90

Courriel : [sm@icedd.be](mailto:sm@icedd.be)

**ECONOTEC Consultants**

Rue des Guillemins 26 / 2<sup>e</sup> étage, 4000 LIÈGE

Contact : MARCHAL Fabienne, Consultant

Tél. : 04 349 56 18 — Fax : 04 349 56 10

Pour le compte de :

**Service public de Wallonie**

**Direction générale opérationnelle Aménagement du territoire,**

**Logement, Patrimoine et Energie**

**Département de l'Énergie et du Bâtiment durable**

Avenue Prince de Liège 7, 5100 Jambes

Tél : 081 33 56 40 — Fax : 081 33 55 11

Courriel : [Energie@spw.wallonie.be](mailto:Energie@spw.wallonie.be)

Site portail de l'énergie de la Région wallonne :

<http://energie.wallonie.be>

En partenariat avec :

**essenscia wallonie asbl** where chemistry meets life sciences Diamant

Building Boulevard Auguste Reyers, 80 B - 1030 Bruxelles

Tél : +32 2 238 98 51

Editeur responsable :

Dominique Simon, Directeur

Crédits photographiques :

photo de couverture : " cooling tower ", [www.bacd.com](http://www.bacd.com)

1<sup>ère</sup> diffusion électronique, édition septembre 2010