



We will be under the same roof

*Ingénierie des Procédés- Etudes Générales
Audits Energétiques- Cogénération*

GUIDE DU FROID

Date : 01/2008
Rév. : 0
Par : PARTNERS

18, rue Nelson Mandela 2045 L'Aouina-Tunis
Tél. : (00 216) 71 724 032/760 110 – Fax : (00 216) 71948 402/71 760 110/724 032
Mobile : (00 216) 98 270 992
e-mail : nejib.boujnah@partners-tun.com
Site web : partners-tun.com

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION :	3
2. FLUIDES FRIGORIGENES :	3
3. LA MACHINE THERMODYNAMIQUE A COMPRESSION :	4
3.1 .SCHEMA DE PRINCIPE :	4
3.2. SELECTION D’UN GROUPE FRIGORIFIQUE :	5
3.3 CYCLE DE MOLLIER :	6
3.4. COEFFICIENT DE PERFORMANCE (COP):	7
3.4.1 Le Groupe frigorifique :	7
3.4.2. La pompe à chaleur (PAC) :	8
3.4.3. Thermofrigopompe :	8
3.5. CONSOMMATION :	9
4. INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES :	9
5.2. LES CONDITIONNEURS DE ZONES AUTONOMES :	11
5.3. CONDUITES DE DISTRIBUTION :	13
6. LA MAINTENANCE :	13

1. INTRODUCTION :

Le froid est utilisé dans divers secteurs de l'industrie et il peut représenter jusqu'au 60% de la consommation électrique. Le tableau ci-dessous présente quelques applications du froid.

	Température recherchée °C	Applications	Domaines
Climatisation	20	Climatisation	Froid du confort
Glace fondante	12	Conservation des fruits	Froid commercial & Froid industriel
	4	Conservation de la viande	
	-22	Surgélation alimentaire	
	-33	Congélation alimentaire	
Ammoniac	-35		
Glace carbonique	-80	Transport frigorifique	

2. FLUIDES FRIGORIGENES :

Une machine frigorifique permet à la fois « d'enlever » de la chaleur (ou production de froid) à l'évaporateur et la fournir au condenseur à travers un fluide frigorigène.

Un fluide frigorigène idéal doit satisfaire aux critères suivants :

- Chaleur latente de vaporisation élevée.
- Point d'ébullition sous la pression atmosphérique suffisamment bas pour que l'installation ne travaille pas sous vide (Pas de risques d'entrée d'air dans le circuit)
- Faible volume spécifique de la vapeur saturée pour l'utilisation d'un compresseur et de tuyauteries de dimensions acceptables, faible chaleur massique.
- Température critique élevée.
- Faible taux de compression.
- Composition chimique stable dans l'installation
- Pas d'action sur les métaux et les joints composants les circuits

- Non inflammable, Non toxique, Facilement détectable, Etre à faible coût

Nous donnons ci-après un tableau comparatif entre les différents fluides frigorigènes les plus utilisés.

Notons que :

- Les volumes spécifiques sont donnés pour une pression de 1 atm et une température de 15°C.
- Les chaleurs latentes de vaporisation sont données au point d'ébullition pour une pression de 1 atm.

Nom	Ammoniac	Mélange azéotrope	Chloro-difluorométhane	Dichloro-difluorométhane	Tétra-fluoroéthane
Formule chimique	NH ₃	-	CHClF ₂	CCl ₂ F ₂	H ₂ FC-CF ₃
Désignation	R 717	R 502	R22	R12	R134a
Chaleur latente de vaporisation Kcal/Kg	327	41,2	55,9	39,6	51,5
Point d'ébullition °C	-33,5	-45	-40,8	29,8	-26,6
Volume spécifique³/Kg	1,411	-	0,275	0,195	0,235
Température critique °C	132	82	96	112	100,9
Taux de compressibilité	0,9929	0,9	0,9831	0,995	1
Plage de température °C	-75	-60 à -20	-50 à 10	-25 à 10	-

En excluant l'utilisation du fréon pour des raisons réglementaires (protection de la couche d'ozone), il apparaît que l'utilisation de l'ammoniac est plus intéressante puisqu'il offre les meilleures propriétés pour la production du froid bien qu'il présente des risques de toxicité pour l'être humain si sa teneur dans l'air dépasse 0,5% en volume.

3. LA MACHINE THERMODYNAMIQUE A COMPRESSION :

3.1 .SCHEMA DE PRINCIPE :

Les éléments constitutifs d'une machine thermodynamique sont :

- Un ou plusieurs compresseurs qui aspirent le fluide frigorigène à l'état gazeux et le compriment en augmentant sa température.
- Un condenseur où le fluide frigorigène se condense en cédant sa chaleur de condensation à un fluide extérieur ou source chaude qui se réchauffe.
- Un détendeur dans lequel le fluide frigorigène est détendu.

- Un évaporateur où le fluide frigorigène s'évapore en prélevant de la chaleur à un fluide extérieur ou source froide.

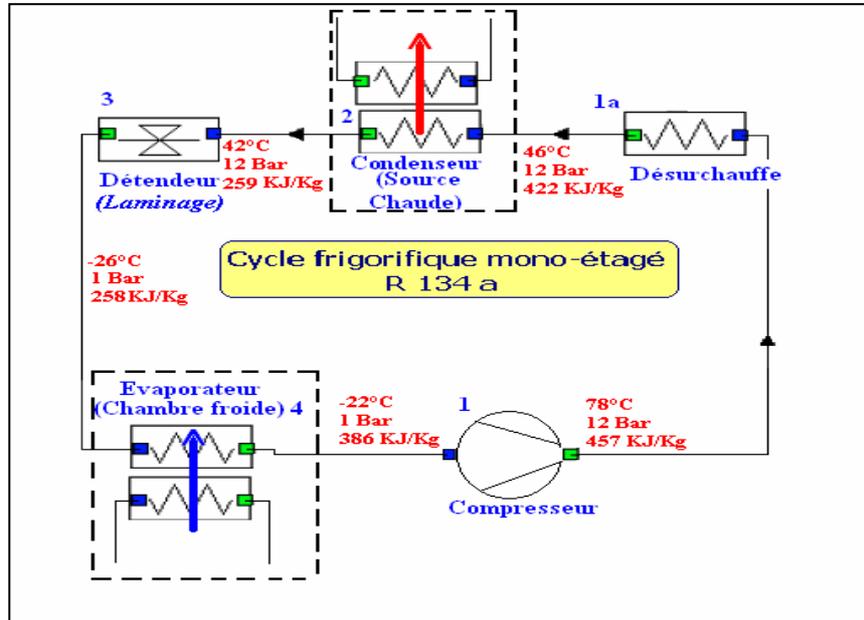


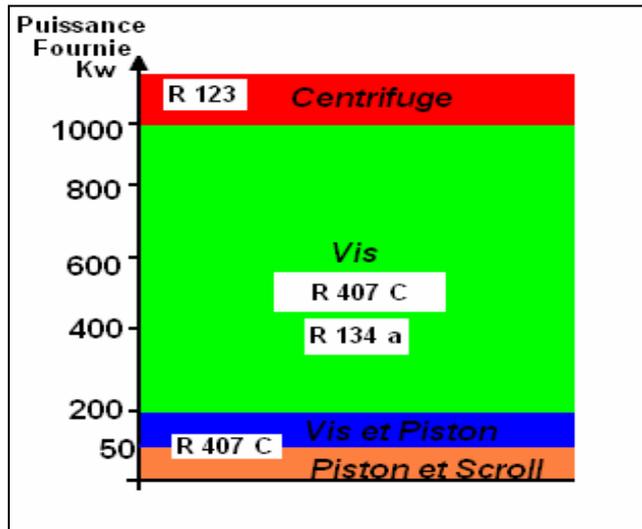
Schéma de principe d'une machine thermodynamique

3.2. SELECTION D'UN GROUPE FRIGORIFIQUE :

Les compresseurs les plus utilisés dans les groupes frigorifiques sont :

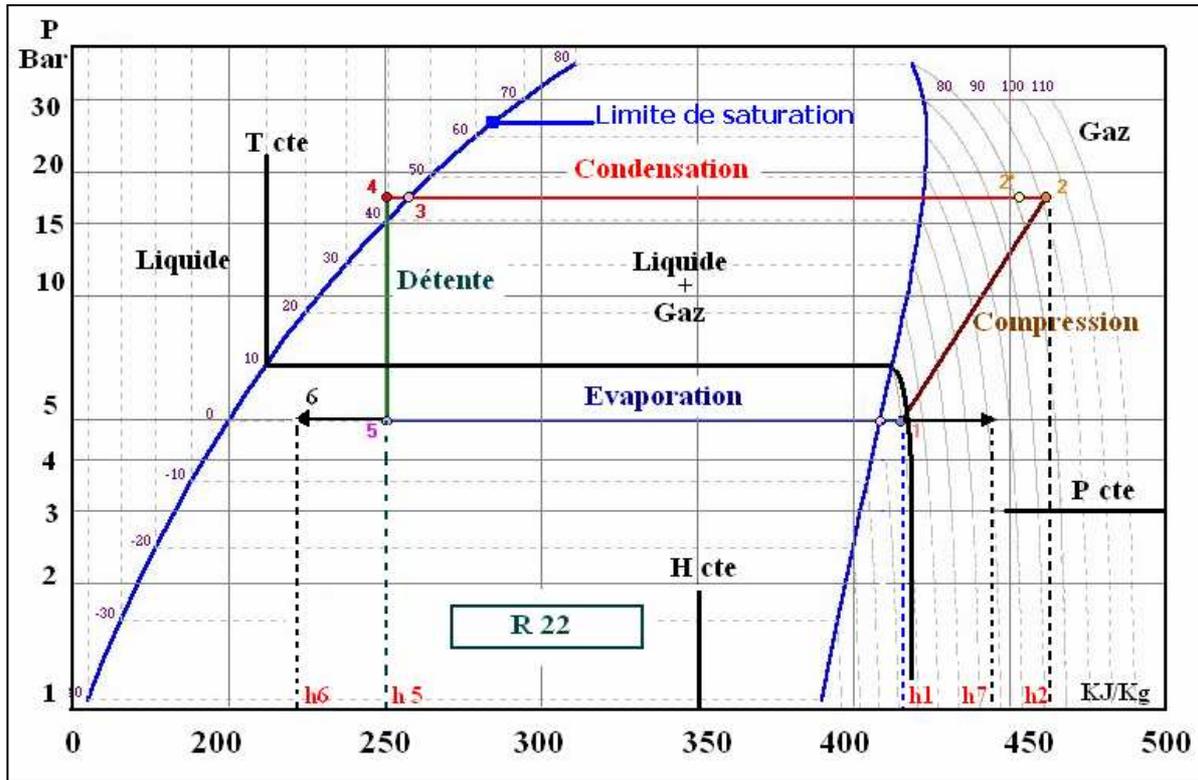
- Les compresseurs à vis
- Les compresseurs à piston
- Les compresseurs centrifuges
- Les compresseurs Scroll

La sélection du type de compresseur dépend de la puissance frigorifique fournie comme l'indique la figure ci-dessous :



3.3 CYCLE DE MOLLIER :

Le diagramme de Mollier du fluide considéré a pour axes la pression P et l'enthalpie H (par unité de masse). Sur ce diagramme, des séries de courbes sont déjà tracées : isothermes, isentropiques, isochores (volume constant) ainsi que la courbe de saturation limitant le domaine de coexistence de deux phases (liquide et gaz). Le schéma ci-dessous représente le cycle de Mollier pour le R 22 :



Cycle de Mollier pour le R22

3.4. COEFFICIENT DE PERFORMANCE (COP):

3.4.1 Le Groupe frigorifique :

Lorsqu'on s'intéresse seulement à la production du froid coté Evaporateur, on parle d'un groupe frigorifique.

La performance d'un groupe frigorifique s'exprime par le rapport entre l'énergie utile

$W_{\text{évaporation}}$ (Energie frigorifique cédée à la source froide) et l'énergie électrique payée

$W_{\text{compression}}$ soit :

$$COP_f = W_{\text{évap}} / W_{\text{cmp}} = T_{\text{évap}} / (T_{\text{cond}} - T_{\text{évap}}) = (h_1 - h_5) / (h_2 - h_1)$$

Prenons le cas du R22, tel que présenté ci-dessous:

- $COP_f = T_{\text{évap}} / (T_{\text{cond}} - T_{\text{évap}}) = 270 / 90 = 3$
- $COP_f = (h_1 - h_5) / (h_2 - h_1) = (415 - 250) / (470 - 415) = 165 / 55 = 3$

Le COP du groupe frigorifique varie entre 2 et 5 selon les conditions de fonctionnement

- on cherche donc à augmenter la longueur du segment ($h_1 - h_5$)
- on a donc intérêt à utiliser au maximum la chaleur latente d'évaporation ($h_7 - h_6$)

L'augmentation de la quantité du froid produite est alors obtenue :

- en déplaçant le point 1 vers la droite, grâce à **une surchauffe** du fluide.
- en déplaçant le point 5 vers la gauche, grâce à **un sous refroidissement** du fluide.

3.4.2. La pompe à chaleur (PAC) :

Lorsque seule la production de chaleur côté condenseur est utilisée, on parle de pompe à chaleur dont la performance s'exprime par le rapport entre l'énergie utile $W_{\text{condensation}}$ (Energie calorifique cédée à la source chaude) et l'énergie électrique payée $W_{\text{compression}}$ soit :

$$\text{COP}_c = W_{\text{cond}} / W_{\text{cmp}} = T_{\text{cond}} / (T_{\text{cond}} - T_{\text{évap}}) = (h_2 - h_4) / (h_2 - h_1)$$

Le COP d'une pompe à chaleur varie entre 2 et 4 selon les conditions de fonctionnement

3.4.3. Thermofrigopompe :

Une thermofrigopompe fonctionne simultanément comme pompe à chaleur et groupe frigorifique. Elle permet donc d'obtenir le cumul des COP frigorifique et calorifique. Dans des conditions optimales, le COP peut atteindre une valeur de 7. Il est défini par :

$$\text{COP}_{\text{cumulé}} = W_{\text{évap}} + W_{\text{cond}} / W_{\text{cmp}} = (h_2 - h_4 + h_1 - h_5) / (h_2 - h_1)$$

3.5. CONSOMMATION :

La puissance d'un compresseur peut être exprimée comme suit :

$$W = n/(n-1) \cdot \rho_1 \cdot Q \cdot P_{\text{évaporateur}} \left[\left(\frac{T_{\text{condenseur}}}{T_{\text{évaporateur}}} \right)^n - 1 \right]$$

Où :

- W : Puissance [W]
- n : Coefficient Polytropique.
- $P_{\text{évap}}$: Pression d'aspiration [Pas].
- Q : Débit massique [kg/s]
- P_{cond} : Pression de refoulement [Pas]
- ρ_1 : Volume massique [m³/kg]
- 1°C en plus à l'évaporateur, c'est 3% de consommation en moins.
- 1°C en moins au condenseur, c'est 3% de consommation en moins.

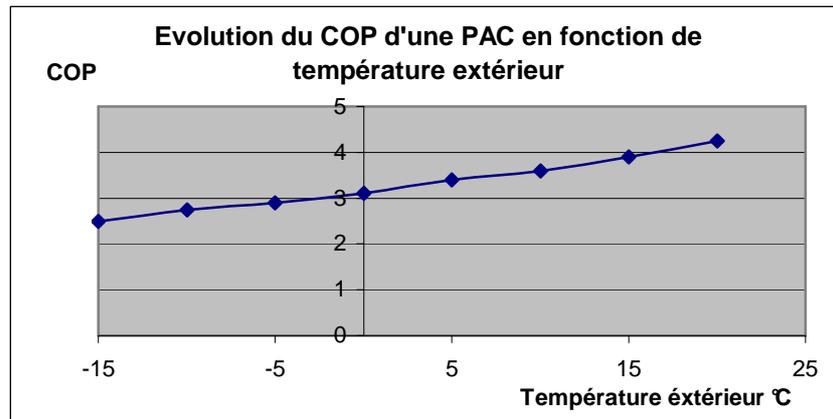
4. INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES :

- La performance d'un groupe frigorifique peut être améliorée en jouant sur les deux paramètres :
 - La température de condensation qui est fixée par la température extérieure (Température de l'air ou la température de retour de la tour de refroidissement).
 - La température d'évaporation est fixée par la température de départ d'eau glacée (Température dans le réseau de distribution).

	Condenseur à air	Condenseur à eau
Δ Entrée/Sortie	5 à 10°C	10 à 15°C
T condensation °C	T entrée +10 → T entrée +20	T entrée → T entrée + 5

L'utilisation d'un condenseur à eau permet d'économiser au minimum 15% de la consommation énergétique

- La performance d'une pompe à chaleur varie linéairement en fonction de la température extérieure, comme l'indique la courbe ci-après :



Source : *Les cahiers de l'ingénieur*

5. EQUIPEMENTS ANNEXES :

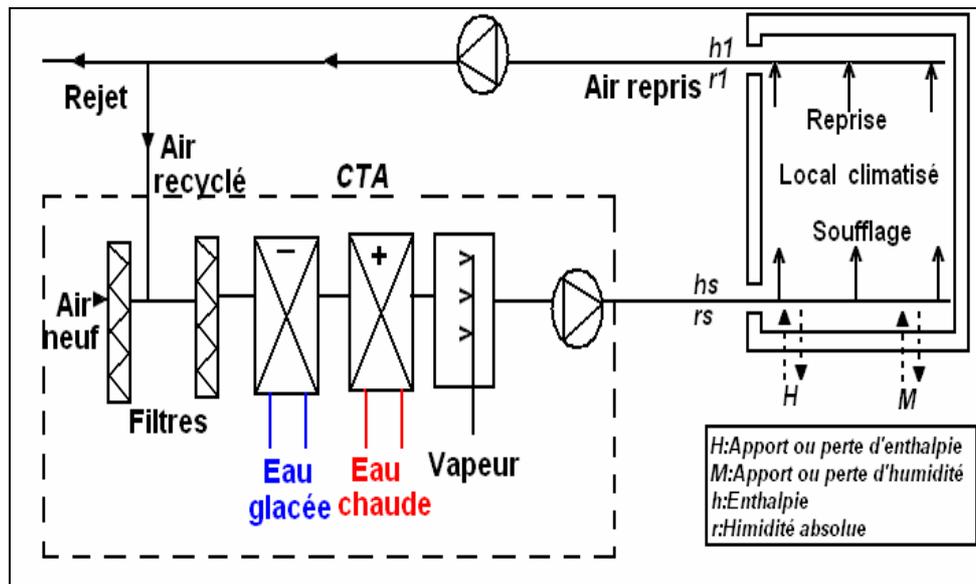
5.1 CENTRALE DE TRAITEMENT D'AIR (CTA):

Les centrales de traitement d'air assurent les différentes fonctions indispensables au traitement de l'air et constituent un élément essentiel d'une installation de conditionnement.

On distingue deux grandes familles de CTA :

- Les centrales à ventilation tout air neuf, où l'air pris à l'extérieur est introduit dans le local après les traitements nécessaires.
- Les centrales à ventilation par mélange air neuf/air repris qui comporte une chambre de mélange entre l'air extérieur et l'air du local partiellement recyclé.

Le schéma ci-dessous représente un modèle simple pour une **C.T.A** :



5.2. LES CONDITIONNEURS DE ZONES AUTONOMES :

Un conditionneur comporte tous les éléments nécessaires au refroidissement, au chauffage, à la filtration et à la ventilation d'air. Ils sont généralement adaptés pour les zones dispersées ou dont les besoins thermiques sont différenciés.

On rencontre différents types de conditionneurs :

- Armoire autonome à condenseur à eau
- Armoire autonome à condenseur à air
- Armoire autonome « Split System » à air
- Conditionneur autonome de toiture « Roof Top »

Le tableau ci-dessous récapitule la différence entre la CTA et les conditionneurs.

Type de conditionnement	Conditionnement Centralisé	Conditionnement décentralisé
Définition	La production du froid ou/et de chaleur est réalisée de façon centralisée par des machines thermodynamiques et distribuée par un réseau d'eau chaude et d'eau froide	Le matériel de production est disposé à l'endroit des besoins à satisfaire.
COP_{f max}	5	3,5 (Split)
Technologie utilisée	CTA	Les conditionneurs
Régulation	<ul style="list-style-type: none"> - Pour un débit d'air constant la régulation est assurée par une sonde de température placée sur la reprise d'air et par des hygromètres placés au soufflage. - Pour un débit variable, une sonde de température agit sur la position d'un registre au soufflage, toutefois des variateurs de fréquences sont recommandés. 	-les capteurs doivent être correctement implantés pour que les mesures effectuées soient représentatives de l'état thermique de la zone.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de conduite - Facilité de maintenance - Possibilité d'extension - Adaptation aux besoins de chaque local. 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité d'installation - Souplesse de régulation - Adaptation aux besoins de chaque zone.

5.3. CONDUITES DE DISTRIBUTION :

Le transport du froid doit être assuré par des conduites calorifugées afin de réduire les pertes énergétiques. L'absorption de chaleur des tuyauteries d'eau glacée est donnée par la relation:

$$Q = k' \cdot l \cdot (\Theta_i - \Theta)$$

Avec :

- Q: Absorption de chaleur (ou l'apport de froid) [fg] ou [kcal].
- l: Longueur total de tuyauterie [m].
- Θ_i : Température intérieur du local [°C].
- Θ : Température de l'eau glacée ou de la saumure circulant dans la tuyauterie [°C].
- k' : Coefficient d'absorption calorifique linéique de la tuyauterie normalement calorifugée [Kcal/mh°C]

6. LA MAINTENANCE :

La maintenance doit concerner aussi bien les organes mécaniques que le réseau de distribution.

Ceci peut comprendre :

- **Contrôle périodique des circuits :**

- Bouchage partiel :**

- Contrôle de tuyauterie du liquide frigorigé et liquide caloporteur.
 - Nettoyage des échangeurs (Condenseur ou Evaporateur encrassé).
 - Présence d'huile dans l'évaporateur.

- **Vérification du niveau de pression**

- Pression d'évaporation trop élevée**

- Problème compresseur (clapet non étanche)

- Pression d'aspiration et de refoulement tendent à s'égaliser**

- Clapet du compresseur non étanche ou cassé

- Conséquences : diminution de la température de condensation, augmentation de la température d'évaporation, diminution de la puissance frigorifique, échauffement du compresseur.

- **Vérification du niveau de la charge en fluide frigorigène :**

- Manque de fluide frigorigène :**

- Température et pression d'évaporation basse
 - Température et pression de condensation basse
 - Puissance frigorifique faible.

- Excès de fluide frigorigène :**

- Pression et température de condensation élevée
 - Puissance frigorifique en diminution
 - Température de refoulement élevée

Liens utiles:

- www.ademe.fr/Entreprises/Energie/utilites/utilite.asp?ID=2&o=4
- www.energie.arch.ucl.ac.be/cdrom/Climatisation/equipements/machinefrigoifique/cliequMachFrigoComp.htm
- www.antony.cemagref.fr/gpan/fiches_techniques_www.cenerg.ensmp.fr/francais/themes/syst/pdf/modeles_de_systemes/REFLIQ_V_2-3.pdf -
- www.ademe.fr/paysdelaloire/inf/BP_PDF/175.pdf
- www.clauger.com
- www.raee.org/climatisationsolaire/fr/maitrise.php
- mrw.wallonie.be/energieplus/CDRom/communs/frames/cbhoplimequip.htm
- <http://www.discountboutiq.com/>

Bibliographie:

- Cours de climatisation
- Techniques de l'ingénieur
- Les cahiers de l'ingénieur

