

Machine frigorifique et pompe à chaleur

3^{eme} Année LICENCE

Mécanique Energétique

Préparé par

Dr. Litouche Billel

Chapitre 1

Généralités

Sommaire

	page
I. <i>Historique du froid</i>	
1. <i>Introduction</i>	
2. <i>Production du froid</i>	
2.1. <i>Procédés traditionnels :</i>	
2.2. <i>Production de froid Artificiel</i>	
II. <i>Cycle de Carnot</i>	
1. <i>Présentation du cycle de Carnot</i>	
2. <i>Coefficient de performance du cycle de Carnot</i>	
3. <i>Rendement d'une installation frigorifique</i>	
III. <i>Exercices. (Série TD 01)</i>	

I. Historique du froid

1. Introduction :

L'Homme des pays tempérés constaté que les aliments (les denrées) *périssables* pouvaient être conservées dans l'hiver que l'été. Et pour cela l'Homme a longtemps cherché à reproduire les températures hivernales afin de préserver ses denrées même en été. Les Hommes furent amenés à créer de la glace et du froid artificiel

L'utilisation du « froid naturel » s'est faite très tôt et aussi très longtemps puisqu'au début du 20^{ème} siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle

La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. De même, les applications du froid sont très variées.

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variées (industries agroalimentaires, médecine, confort thermique, pétrochimie...) et c'est dans le domaine alimentaire que le froid occupe une place prépondérante, Pour les produits fabriqués par l'industrie agroalimentaire (lait, fromage...), le froid permet d'améliorer leur qualité en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une optimisation des paramètres climatiques influençant le comportement des microorganismes, L'utilisation des atmosphères artificielles permet d'augmenter la durée de conservation de certains fruits et légumes.....

2. Production de froid

Parmi les différentes modes de production du froid, on trouve

2.1. Procédés traditionnels :

Autres que le froid, de conservation des aliments ont été nombreux comme le salage, le saumurage, le séchage et le fumage

- *Le salage : Technique consistant à saler un aliment (viande, fromage, etc.) pour le conserver ou bien consiste à envelopper la denrée avec du gros sel*
- *Le saumurage : liquide à forte concentration de sel dans lequel on conserve les viandes.*
- *Le séchage est une méthode de conservation des aliments par déshydratation. Il permet de ralentir la progression des bactéries.*

- Le fumage : est une méthode de conservation des aliments. Il suffit d'exposer la viande ou le poisson à une grande quantité de fumée pour leur donner une saveur unique.
- Glace naturelle : La glace produite naturellement, était :
 - Soit, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances.
 - Soit, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans les « glaciers » dont les parois devaient être thermiquement isolantes.

2.2. Production de froid Artificiel

2.2.1. Mélange des Liquides

Le mélange de certains sels dans l'eau abaissait notablement la température de la solution ainsi obtenue.

- Le premier à avoir évoqué l'usage, en Inde, au 4^{ème} siècle, de tels mélanges semble être l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia.
- L'usage du refroidissement de l'eau par l'emploi du **salpêtre** (الملح الصخري) est cité par le médecin italien Zimara en (1530).
- Ensuite la découverte que le mélange de neige et de sels par Tancredo (1607) permettait d'atteindre des températures encore plus basses

2.2.2. Divers systèmes frigorifiques

Nous distinguerons deux grandes classes de systèmes frigorifiques : ceux qui consomment, pour fonctionner, de l'énergie mécanique, les systèmes *mécano-frigorifiques*, et ceux qui consomment essentiellement de l'énergie thermique, les systèmes *thermo-frigorifiques*.

2.2.2.1. Systèmes mécano-frigorifiques

Parmi eux, deux familles se détachent :

- Les systèmes à compression de vapeurs
- Les systèmes utilisant des cycles à gaz.

a- *Systèmes à compression de vapeur :*

Une première *description* du cycle a été donnée en 1805 par l'américain Oliver Evans, Mais c'est à l'américain Jacob Perkins qui développe le premier modèle

de la machine à compression de vapeur fonctionnant à l'éthylrique. (1835), La première machine à compression qui a un succès industriel est celle fabriquée par James Harrison (1855) en Australie.

b- Systèmes utilisant des cycles à gaz :

Comme les turbines à gaz, turbines à combinées,

2.2.2.2. *Systèmes thermo-frigorifiques*

On distingue, parmi ces systèmes frigorifiques consommant de l'énergie thermique :

a- Systèmes à adsorption et les systèmes à éjection.

b- Systèmes à absorption.

Bien que leur importance soit beaucoup plus réduite que celle des systèmes à compression, ce sont, actuellement, les seuls systèmes thermo-frigorifiques qui connaissent un certain développement. En 1859 la première machine à absorption continue utilisant le couple :

Frigorigène : *Ammoniac* – absorbant : *Eau*.

II. Cycle frigorifique de Carnot ***Cycle Diathermes***

1. Présentation du cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est composé de deux isothermes et de deux adiabatiques.

- *Cycle diathermes*
- *Agent de transformation : fluide gaz parfait*
- *Deux isothermes réversibles*
- *Deux adiabatiques réversibles*

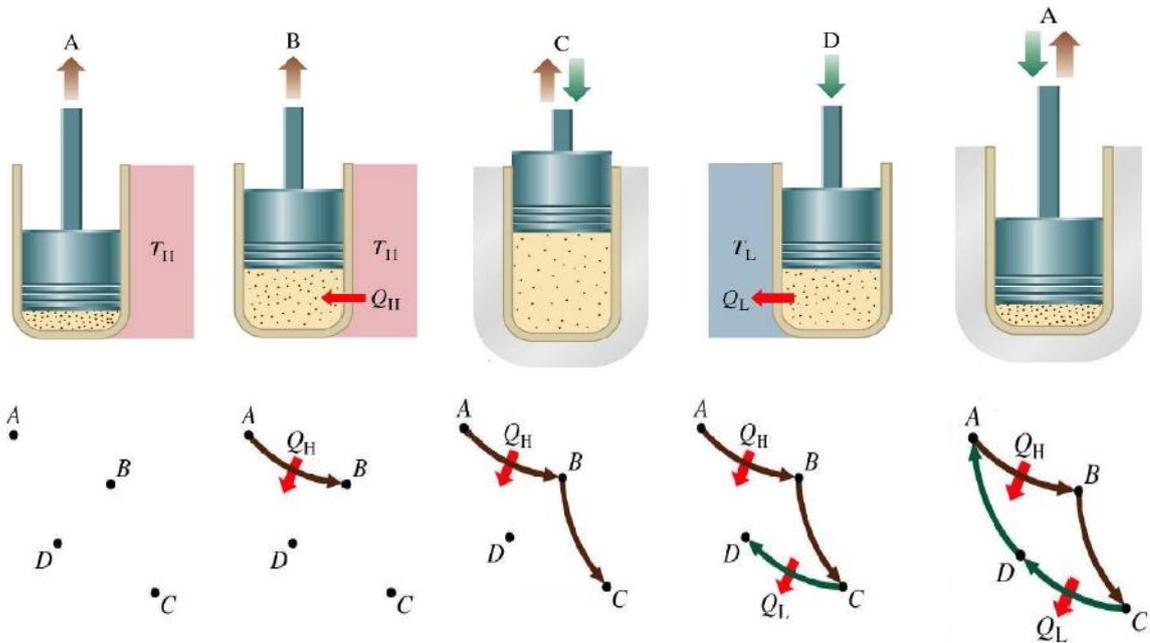


Fig 1.1. Différentes étapes du cycle de Carnot

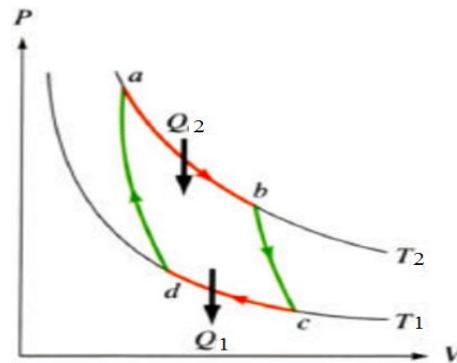


Fig 2.1. Présentation du cycle de Carnot sur le Diagramme P-V (Clapeyron)

- ✓ Le système part du point **a**, à la température T_2 , Le gaz est soumis à une **détente isotherme** de **a** à **b**. Durant ce processus, l'énergie interne du gaz parfait, qui dépend uniquement de sa température, ne varie pas. Le gaz absorbe une quantité de chaleur (Q_2).
- ✓ On isole thermiquement le système au milieu extérieur. Le gaz est soumis à une **détente adiabatique** ($Q = 0$) de **b** à **c** jusqu'à la température T_1 , le travail effectué un positif W_{bc} .
- ✓ Le gaz subit une **compression isotherme** de **c** à **d** à température constante T_1 et cède une quantité de chaleur (Q_1).
- ✓ La dernière étape est une **compression adiabatique** de **d** à **a** durant laquelle la température monte jusqu'à T_2 . Le travail adiabatique effectué par le gaz est égal à l'opposé du travail de l'étape 2, c'est-à-dire $W_{da} = -W_{bc}$.

La partie ABC représente la détente : c'est la course motrice, car le gaz effectue un travail positif sur le milieu extérieur. Sur la partie CDA du cycle le gaz rejette une quantité de chaleur et le milieu extérieur effectue un travail sur lui

2. Coefficient de performance du cycle de Carnot

Notons que

Q₁: Chaleur cédée par le fluide au cours d'un cycle.

Q₂: Chaleur absorbée par le fluide au cours d'un cycle.

On applique :

1^{ER} principe de la thermodynamique :

$$\Delta U_{cycle} = 0 \implies \Delta U_{cycle} = W + Q_1 + Q_2 = 0$$

$$W = - (Q_1 + Q_2)$$

2^{EME} principe de la thermodynamique :

$$\Delta S_{cycle} = 0 \implies \Delta S_2 + \Delta S_1 = 0 \implies \Delta S_2 = -\Delta S_1$$

$$\Delta S_1 = S_d - S_c \quad \& \quad \Delta S_2 = S_b - S_a$$

$$Q_1 = T_1 (S_d - S_c) \quad \& \quad Q_2 = T_2 (S_b - S_a)$$

$$\Delta S_1 = (S_d - S_c) = \frac{Q_1}{T_1} \quad \& \quad \Delta S_2 = (S_b - S_a) = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}$$

Formule de rendement

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie fournie}}$$

➤ Rendement de Carnot

Pour un moteur thermique, l'énergie utile est le travail effectué et l'énergie fournie est la chaleur prise à la source chaude. Ainsi pour un cycle

$$\eta_{car} = \frac{\text{Travail effectué}}{\text{Chaleur source chaude.}}$$

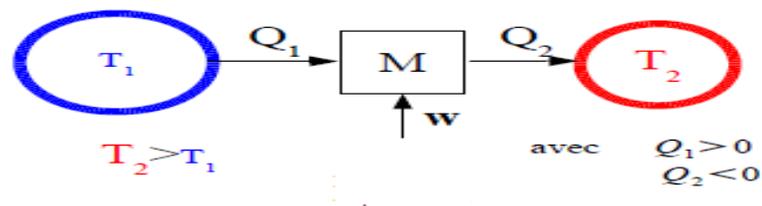
Soit : $S_a = S_d \quad \& \quad S_b = S_c$

$$\eta = \frac{-W}{Q_2} = \frac{(Q_2 + Q_1)}{Q_2} = \frac{[T_2 (S_b - S_a) + T_1 (S_d - S_c)]}{T_2 (S_b - S_a)} = 1 + \frac{T_1 (S_d - S_c)}{T_2 (S_b - S_a)}$$

$$= 1 + \frac{T_1 (S_a - S_b)}{T_2 (S_b - S_a)} = 1 - \frac{T_1 (S_b - S_a)}{T_2 (S_b - S_a)}$$

$$\eta_{car} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

3. Rendement d'une Installation frigorifique



Le principe de réfrigérateur d'absorber la chaleur d'une source froide pour refroidir le milieu, et le rendement donné par :

$$\eta_{IF} = \frac{\text{Chaleur source froide}}{\text{Travail effectué}}$$

$$\eta_{IF} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{-(Q_1 + Q_2)} = \frac{T_1 (S_d - S_c)}{T_2 (S_d - S_c) - T_1 (S_d - S_c)}$$

$$\eta_{IF} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

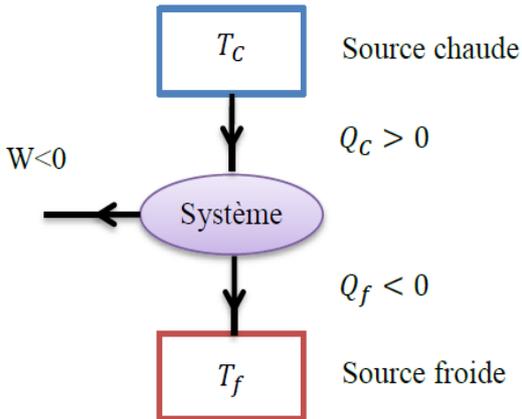
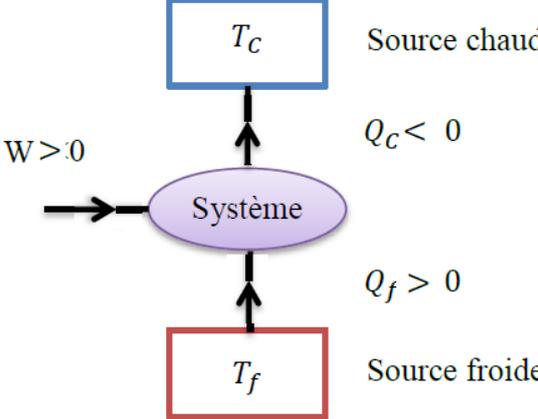
➤ Rendement d'une Pompe à chaleur

Même principe que le réfrigérateur mais avec un but différent : prendre de la chaleur d'une source froide pour chauffer un milieu.

$$\eta_{PAC} = \frac{\text{Chaleur source chaude}}{\text{Travail effectué}}$$

$$\eta_{PAC} = -\frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

➤ *Machines Motrice et Réceptrice*

Schéma de principe d'une machine Motrice	Schéma de principe d'une PAC/ INF (Réceptrice)
	
<p>T_c : température de la source chaude. T_f : température de la source froide. W : Travail du cycle Q_c : Chaleur de la source chaude. Q_f : Chaleur de la source froide. Système : fluide</p>	

Exercice 1

Soit une machine thermique fonctionnant entre deux sources de chaleur T_c et T_f ($T_c > T_f$).

- 1) Faites les schémas de principe et précisez les signes des travaux et des quantités de chaleur dans le cas où cette machine fonctionne comme :
 - Une machine motrice
 - Une pompe à chaleur

- 2) Définir puis exprimer en fonction de T_c et T_f
 - Le rendement maximal de la machine motrice
 - L'efficacité maximale de la pompe à chaleur

Exercice 2

Une installation thermique réversible fonctionne entre deux masses d'eau (capacité thermique $C_p = 4185 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) :

- Une masse d'eau $m_c = 500 \text{ kg}$, source chaude à la température initiale $T_{c,0} = 360 \text{ K}$,
- Une masse d'eau $m_f = 800 \text{ kg}$, source froide à la température initiale $T_{f,0} = 288 \text{ K}$.

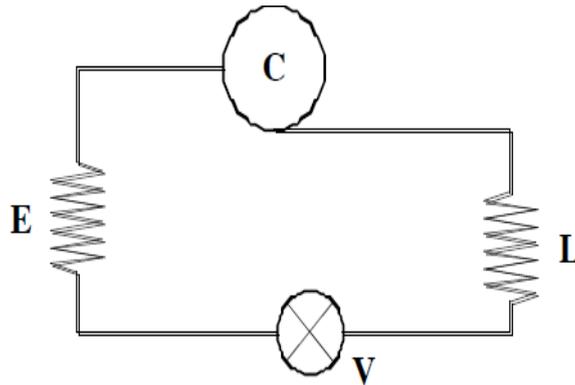
1/ Calculez la température finale, T , atteinte lorsque le moteur cesse de fonctionner.

2/ Déterminer la variation de l'entropie ΔS_1 , le transfert thermique Q_c reçu par la source chaude.

3/ Déterminer la variation de l'entropie ΔS_2 , le transfert thermique Q_f fourni à la source froide.

Exercice 3

Une machine thermique est utilisée pour assurer le chauffage en hiver et le refroidissement en été d'une maison. Donc, cette machine thermique joue le rôle d'une pompe à chaleur en *hiver* et d'un climatiseur en *été* (voir la figure ci-dessous). Le fluide moteur est le *fréon*. Ce fluide est comprimé par un compresseur (C) et se condense dans un condenseur (L). Puis il subit une détente au niveau d'une valve (V) et finit de se vaporiser dans l'évaporateur (E) avant de retourner dans le compresseur.



Questions

1/ Dans telle machine thermique, lequel des deux organes L ou E faut-il mettre en contact avec la source chaude et la source froide ?

2/ En *hiver* la température extérieure est de 5 °C et la température intérieure (dans la maison) est maintenue à 20 °C.

- a- Calculez la quantité de chaleur maximale qui peut fournir 1kg de l'air à la maison au bout d'une heure si la capacité thermique de l'air $C_p = 1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, en utilisant $Q = mC_p\Delta T$
- b- En déduire le coefficient de performance maximal du récepteur thermique.

3/ En *été*, la température extérieure est de 45 °C et la température intérieure est maintenue à 20 °C.

- a- Quel est le coefficient de performance maximal du récepteur thermique ?
- b- Comparez-les avec celui du circuit de Carnot

Série TD 02

Test de connaissance

I. Repondez par Vrai ou Faux

Questions	Vrai	Faux
1. Le compresseur joue le rôle d'une pompe		
2. Une installation frigorifique est pour but de chauffer les locaux		
3. L'évaporateur permet d'extraire la chaleur du milieu à refroidir		
4. Le détendeur est un organe utilisé pour diminuer la pression		
5. Le compresseur aspire et comprime et refoule le liquide provenant d'EV		
6. Le parcours du fréon est un système ouvert		
7. La condensation est un phénomène subit par le fluide au niveau du condenseur		
8. La PAC est une machine motrice		
9. Pour extraire la chaleur on doit fournir un travail		
10. Le signe de la source froide dans l'installation frigorifique est négatif		
11. L'évaporation est un changement d'état nécessite un apport de chaleur		
12. Si l'évaporateur est en contact avec la source chaude on parle d'une IF		
13. Si le condenseur est en contact avec la source froide on parle d'une PAC		
14. Le rendement du cycle de Carnot est toujours supérieure à l'unité		
15. Les échangeurs de l'installation frigorifique fonctionnent dans le sens opposé		

II. Cochez la bonne réponse :

1. La condensation est une transformation qui :

- a. Absorbe de la chaleur
- b. Diminue la pression
- c. Dégage de la chaleur



2. En traversant l'évaporateur, le fluide frigorigène absorbe de la chaleur.

- a. Vrai
- b. Faux
- c. Dépend du type de fluide



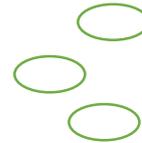
3. La température de condensation du fluide frigorigène dépend de la température ambiante

- a. Vrai
- b. Faux
- c. Dépend du type de l'installation



4. Si le bulbe d'un détendeur thermostatique se perce, toute la charge en fluide frigorigène de l'installation part à l'atmosphère.

- a. Vrai
- b. faux
- c. dépend de la position du détendeur dans l'installation



**5. Au sein d'un condenseur, quelles sont les différentes zones que l'on peut trouver ?
(Plusieurs réponses possible)**

- a. La zone de condensation
- b. La zone de désurchauffe
- c. La zone de surchauffe
- d. La zone de sous-refroidissement



6. Le cycle de Carnot contient deux transformations

- a. Deux isothermes et deux adiabatiques
- b. Deux isothermes et deux Isobares
- c. Deux Isobares et deux Isochores



Cycle Thermodynamique D'une Machine Frigorifique A Compression De Vapeur

Sommaire

Page

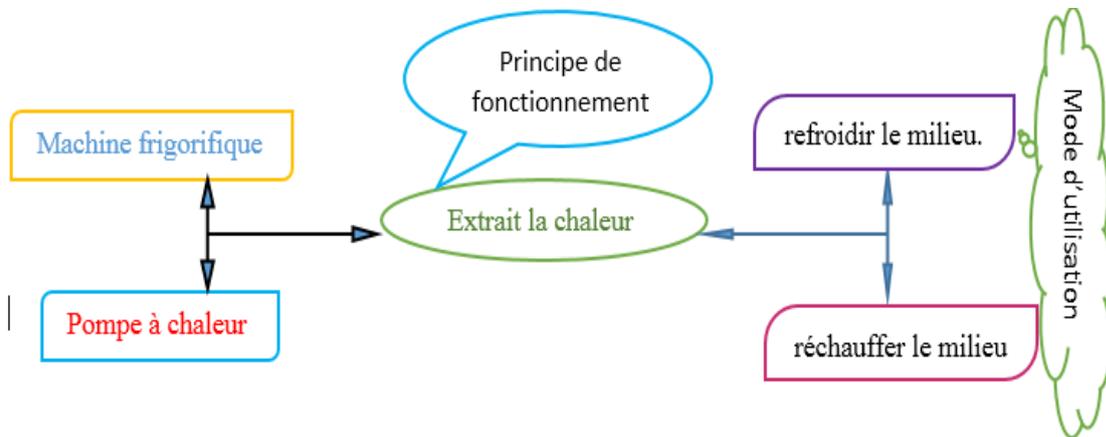
1. *Généralité*
2. *Principe de fonctionnement*
3. *Représentation du cycle frigorifique*
 - 3.1. *Diagramme Mollier*
 - 3.2. *Cycle de référence (base)*
 - 3.3. *Cycle pratique*
 - 3.3.1. *Surchauffe*
 - 3.3.2. *Sous-Refroidissement*
 - 3.3.3. *Ecart total sur l'air*
4. *Bilan énergétique*
 - 4.1. *Puissance de chaque composant*
 - 4.2. *Coefficient de performance*
5. *Fluide frigorifique*
- 6.

1. Généralité

La chaleur ne peut pas passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens antinaturel, *d'un milieu froid vers un milieu chaud*, il faut, nécessairement, d'une part, mettre en œuvre un système thermique particulier, et, d'autre part, fournir de l'énergie au système.

Le système thermodynamique particulier mis en œuvre est susceptible de transférer effectivement de la chaleur d'un milieu à température inférieure où la chaleur est prélevée (source froide) vers un milieu à température supérieure où la chaleur est rejetée (source chaude). Lorsque le but recherché est l'extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de **produire du froid**, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de **machine frigorifique**. L'effet utile est la chaleur extraite (ou le froid produit) à la source froide

Machines à compression on distingue selon le mode d'utilisation



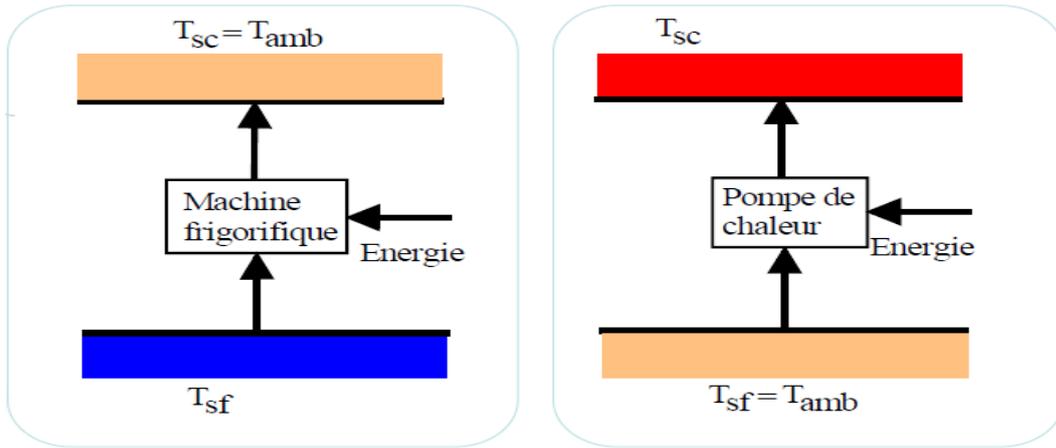


Figure 1.2. Mode d'utilisation

2. Principe de fonctionnement

Une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur (réfrigérateur ou pompe à chaleur) est une machine thermique ditherme (figure 1) opérant entre une source de chaleur FROIDE et CHAUDE, fonctionnant en régime (*Réceptrices*) inverse de celui des cycles (*Motrices*).

- ✓ Une quantité de chaleur Q_f est absorbée de la source de chaleur froide.
- ✓ Une quantité de chaleur Q_c est cédée à la source chaleur chaude.
- ✓ Un travail mécanique W est absorbé par la machine pour accomplir le transfert de chaleur du milieu froid au milieu chaud.

Pour créer du froid, l'installation fait circuler en boucle un **liquide réfrigérant** qui subit une série de **changements d'état** et/ou de température en passant par quatre composants :

1. Compresseur,
2. Condenseur,
3. Détendeur,
4. Evaporateur

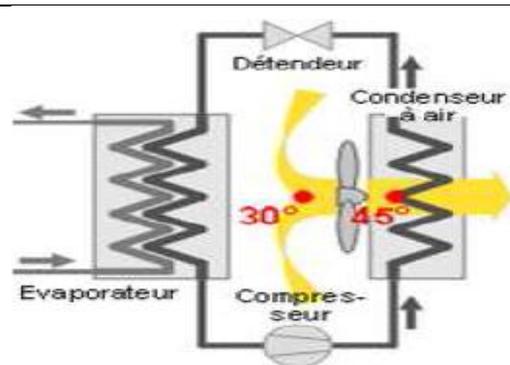


Fig 2.2. Composants d'une machine frigorifique

Une machine frigorifique fonctionne entre deux niveaux de pression, la basse pression ou pression d'évaporation (BP) et la haute pression ou pression de condensation (HP). Elle comporte quatre composants de base

- ✓ **Evaporateur** : placé dans le milieu à refroidir (par exemple une chambre froide) pour assurer l'absorption de la quantité de chaleur Q_f qu'on appelle *production frigorifique* où l'on doit maintenir la température intérieure T_{int} . Le fluide frigorigène qui y entre en *phase liquide* s'évapore à la température $T_{ev} < T_{int}$ en absorbant la chaleur latente nécessaire de la source froide.
- ✓ **Condenseur** : placé dans le milieu auquel on désire céder la quantité de chaleur Q_c et refroidi par le fluide extérieur, air ou eau, à la température T_{ext} où le réfrigérant, qui y entre en *phase vapeur*, se condense à une température $T_{cd} > T_{ext}$ en cédant de la chaleur latente au fluide de refroidissement.
- ✓ **Compresseur** : Cet appareil est l'organe principal de l'installation frigorifique il aspire la vapeur provenant de l'évaporateur puis la comprimer et la refouler vers le condenseur, cette opération conduire à l'augmentation de pression à l'entrée du condenseur, cet organe est placé entre les deux échangeurs.
- ✓ **Détendeur** (valve d'expansion) dont le rôle est de régler le débit du réfrigérant circulant dans l'installation et assurer la détente du réfrigérant (réduire la pression) entre les deux échangeurs.

Ce système est régulé par un thermostat afin d'obtenir une température constante, ou bien par un pressostat pour le réglage de pression

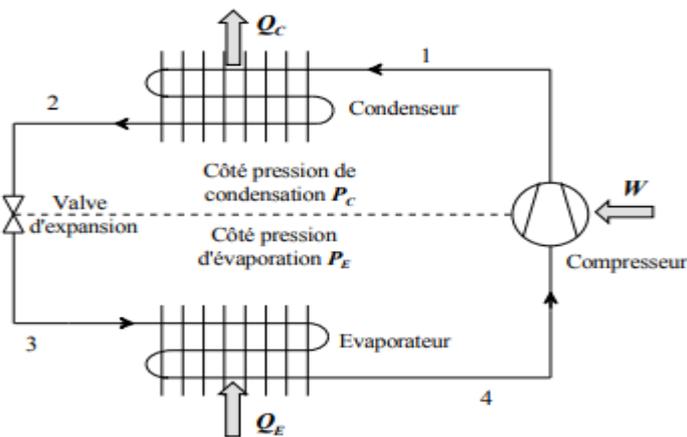


Fig 3.2. Schéma de principe de fonctionnement d'une machine frigorifique

➤ **Fonctionnement d'une machine frigorifique à compression**

La machine à compression est un système fermé contient un fluide du travail (*fréon*), il se compose de deux échangeurs, l'un est appelé *évaporateur* il absorbe la chaleur de l'environnement, et l'autre est le *condenseur* il dégage la chaleur absorbée. Entre ces deux échangeurs se trouve le *compresseur* (pompe), la *vapeur* provenant de l'évaporateur à *basse pression* est aspirée par le compresseur puis elle se comprimer (*augmentation de la pression*), et par conséquent il aura un accroissement de la température, la vapeur comprimée est refoulée par le compresseur aux condenseur à *haute pression*. La chute de pression pour le retour du *liquide* à l'évaporateur est assurée par un *détendeur* (vanne d'expansion) qui relie les deux échangeurs.

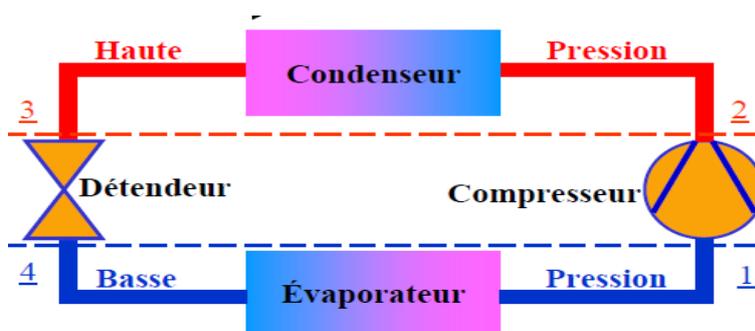


Fig 4.2. Composant du circuit

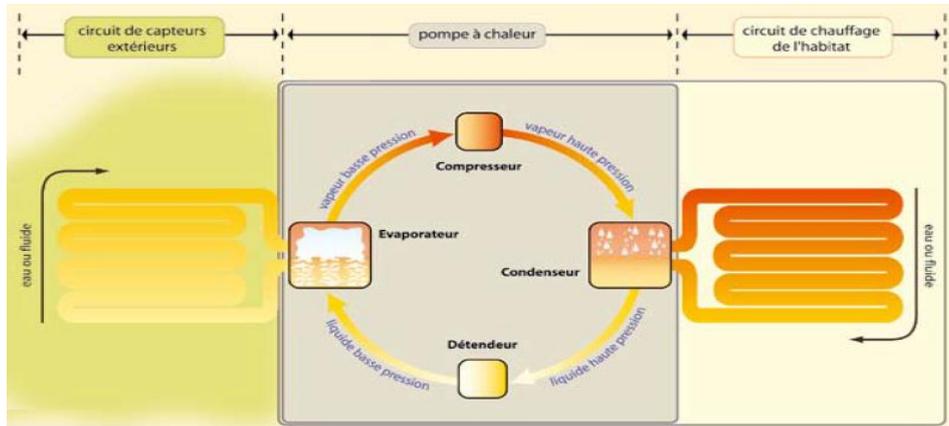


Fig 5.2. Principe de fonctionnement

3. Représentation du Cycle frigorifique

3.1. Diagramme Mollier

Les cycles frigorifiques sont, le plus souvent, représentés sur le diagramme (log P -h). La figure 3, représente les différentes évolutions thermodynamiques à un paramètre constant dans le diagramme enthalpique (isotherme, isobare, isochore, etc).

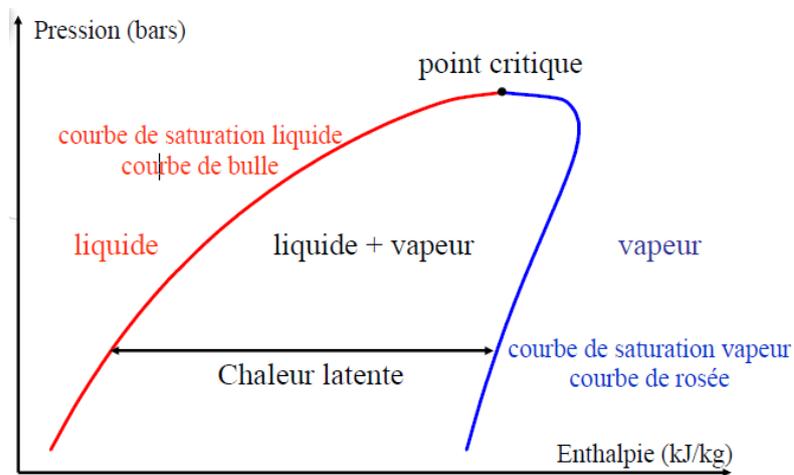


Fig 6.2. Evaluation du fluide frigorigène sur le diagramme de Mollier

3.2. Cycle de référence (Base)

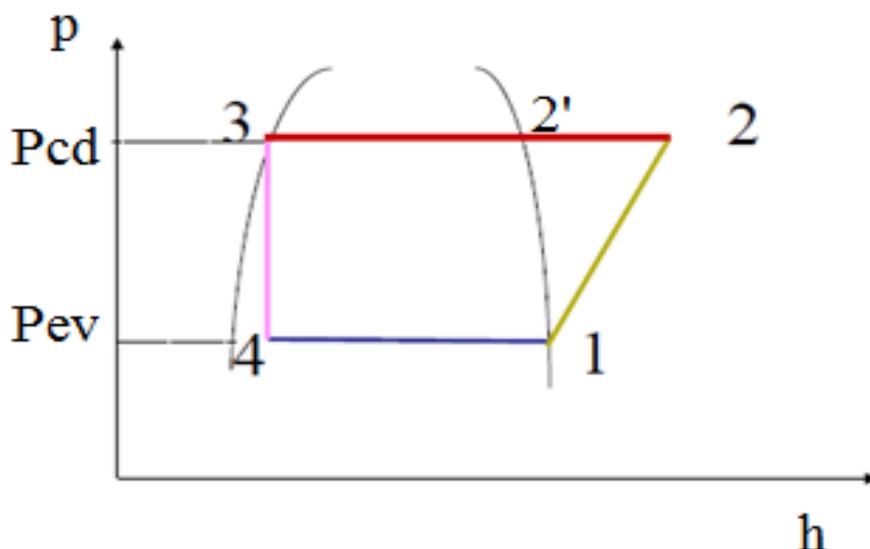


Fig 7.2. Présentation du cycle de **Base**

1-2 : La vapeur du fluide frigorigène sèche est comprimée dans le compresseur au niveau de pression de condensation P_{cd} . (*Compression isentropique*)

2-3 : Le fluide frigorigène dans le condenseur est refroidi dans un premier temps à la température de condensation T_{cd} (processus $2 \rightarrow 2'$ baisse de température). La vapeur est ensuite condensée. Les deux processus se déroulent à la pression de condensation P_{cd} . (*Condensation isobare*)

3-4 : Le fluide frigorigène liquide se détend dans l'organe d'étranglement pour atteindre le niveau de pression d'évaporation le plus bas P_{ev} et la température d'évaporation T_{ev} . Le processus se déroule à un niveau d'enthalpie constant. (*Détente Isenthalpique*)

4-1 : Le fluide frigorigène est évaporé dans l'évaporateur à une pression d'évaporation P_{ev} constante ou à une température d'évaporation T_{ev} constante. (*Evaporation isobare*)

3.3. Cycle pratique

3.3.1. Surchauffe

Un compresseur de fluide frigorigène peut transporter, en raison de sa construction, que des gaz ou de la vapeur. Les liquides ne peuvent pas être comprimés et ne sauraient par conséquent figurer dans la chambre à compression du compresseur

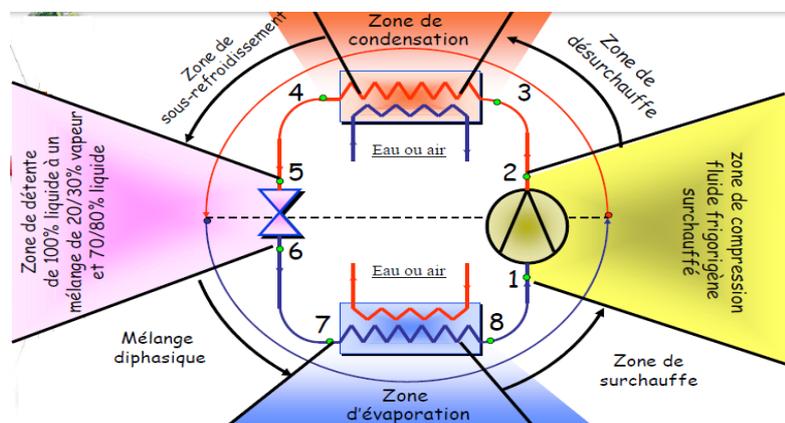


Fig 8.2. Parcours du fluide dans différents composants d'une IF

Afin d'éviter toute aspiration de liquide, l'état d'aspiration du compresseur est décalé de la ligne de rosée vers la droite. On „**Surchauffe**“ la vapeur du fluide frigorigène. Sa température T_1 est située au-dessus de la température T_{ev} . La surchauffe est calculée de la manière suivante :

Surchauffe = température de sortie d'évaporateur - température de changement d'état

$$\Delta T_{sch} = T_1 - T_{ev}$$

ΔT_{sch} : Ecart de la surchauffe à la sortie d'évaporateur compris entre (5 - 10) en (°C)

T_1 : Température d'aspiration du compresseur en (°C)

T_{ev} : Température d'évaporation du fluide en (°C)

3.3.2. Sous-Refroidissement

Si l'installation frigorifique est exploitée de telle sorte que l'état "Entrée détendeur" se trouve directement sur la courbe de séparation gauche (ligne d'ébullition), les moindres variations des conditions d'exploitation peuvent provoquer la formation de bulles à l'avant du détendeur

Pour cette raison, l'état entrée détenteur T_5 est déplacé de la ligne d'ébullition vers la zone liquide et on parle alors de „Sous-refroidissement“. Qui garantit une alimentation en liquide à l'avant de la soupape de détente,

Le sous-refroidissement est calculé de la manière suivante :

Sous refroidissement = température de condensation - température de sortie de condenseur

$$\Delta T_{Srf} = T_{cd} - T_5$$

ΔT_{Srf} Ecart du sous-refroidissement à la sortie du condenseur compris entre (3 - 8) en (°C)

T_5 Température du FF à la sortie du condenseur en (°C)

T_{cd} Température de condensation en (°C)

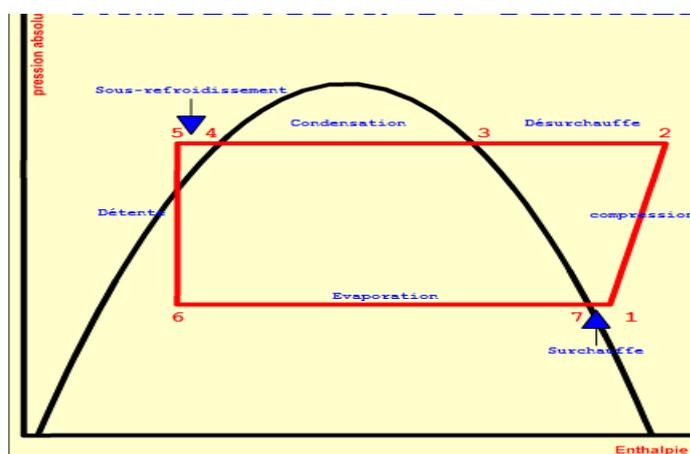


Fig 9.2.. Présentation du cycle *Pratique*

Etat du fluide aux différents points du cycle :

Point	Etat	Température	Pression
1	Vapeur Surchauffée	$T_1 > T_{ev}$	p_{ev}
2	Vapeur Surchauffée	$T_2 > T_{cd}$	p_{cd}
3	Vapeur saturante	$T_3 = T_{cd}$	p_{cd}
4	Liquide saturant	$T_4 = T_{cd}$	p_{cd}
5	Liquide Sous-refroidi	$T_5 < T_{cd}$	p_{cd}
6	Liquide-Vapeur saturant	$T_6 = T_{ev}$	p_{ev}
7	Vapeur saturante	$T_7 = T_{ev}$	p_{ev}

3.3.4. Ecart total sur l'air

Evaporateur air/condenseur air	CONDENSEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	5-10°C
	Ecart t° condensation - entrée air	11-15°C
	EVAPORATEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	6-10°C
	Ecart t° entrée air - T° évaporation	15 -20°C
	Surchauffe	5-8°C
	Sous-refroidissement	4-7°C
Evaporateur air/condenseur eau perdue	CONDENSEUR	
	Ecart t° entrée eau - sortie eau	10-15°C
	Ecart t° condensation - sortie eau	5 -7°C
	EVAPORATEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	6 -10°C
	Ecart t° entrée air - T° évaporation	15-20°C
	Surchauffe	5-8°C
	Sous-refroidissement	4-7°C

4. Bilan énergétique

4.1. Puissance de chaque composant

Utilisons l'expression du premier principe de la thermodynamique soit :

$$\Delta h = W + Q$$

4.1.1. Sur l'Evaporateur (production du froid) :

Puissance frigorifique Q_f d'une installation est donnée par la formule suivante

$W=0$ Il n'y a pas du travail fournit donc :

$$Q_l = \Delta h = h_1 - h_6$$

h_1 Enthalpie à l'aspiration du compresseur (Kj/kg)

h_6 Enthalpie à l'entrée d'évaporateur (Kj/kg)

Q_l Chaleur latente absorbée par l'évaporateur (Kj/kg)

- La puissance frigorifique Q_f se calcule comme suite

$$Q_f = \dot{m} Q_l$$

$$Q_f = \dot{m} (h_1 - h_6)$$

\dot{m} Débit du fluide frigorifique circulant dans l'installation (Kg/s)

4.1.2. Sur le Condenseur :

- La puissance calorifique du condenseur

$W=0$ Il n'y a pas du travail fournit

$$Q_C = \dot{m} (h_5 - h_2)$$

4.1.3. Sur le Compresseur :

- Le travail du compresseur est donné par :

$Q=0$ il n'y a pas un échange thermique

$$W_{Cp} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

4.1.4. Sur le Détendeur :

- Transformation Isenthalpique : $h = \text{Constante}$

$$\Delta h = 0$$

$$h_5 - h_6 = 0$$

$$h_5 = h_6$$

4.2. Coefficient de performance, COP

Le COP est coefficient qui représente la rentabilité du système et aussi c'est un indicateur qui nous permet de distinguer entre les différents systèmes utilisés

Expression du COP

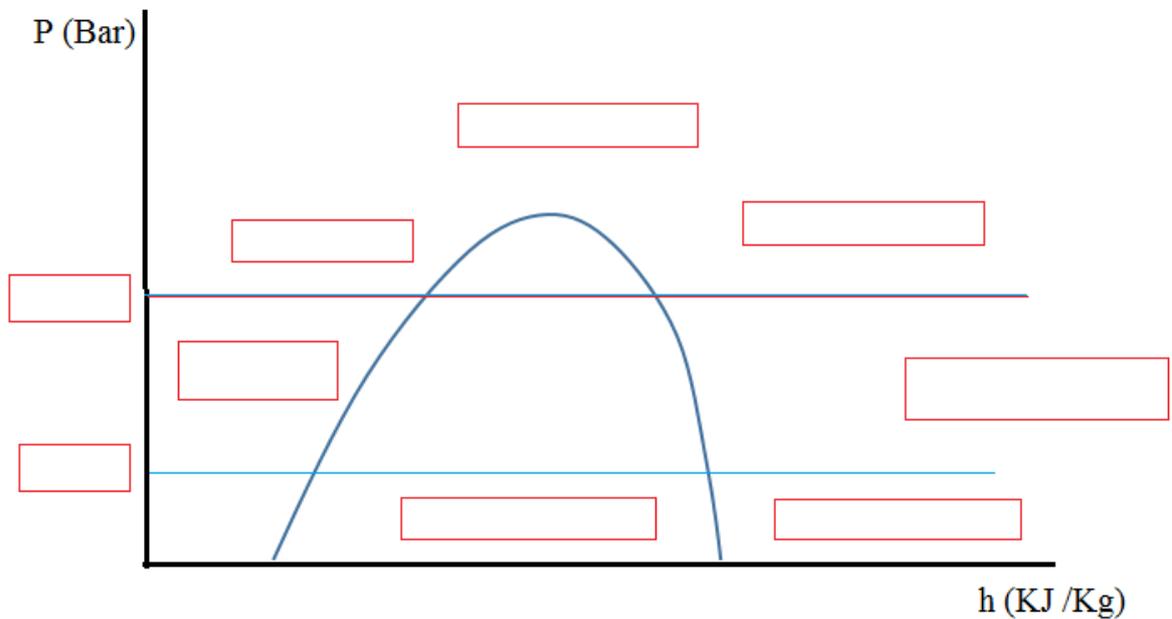
$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance frigorifique produite à la source froide}}{\text{Puissance consommée}} = Q_f / W_{Cp}$$

5. Fluide frigorifique

Série TD 03

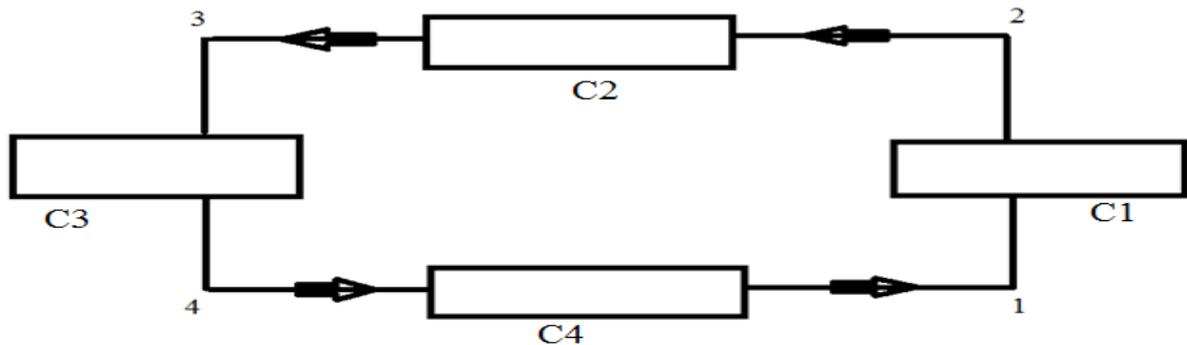
Exercices 1

Tracer le cycle du parcours du fluide et Remplir les cases vides



Exercices 2

Une machine thermique (voir schéma ci-dessous) est constituée de quatre composants parcourus par un fluide, *fréon R410A*, dont le sens de parcours est représenté par les flèches. On considère que le fréon subit un écoulement en régime permanent aux bornes des quatre composants. Chaque composant est relié à une seule entrée et une seule sortie.



- ✓ Au point 1, le fluide est sous forme de Vapeur surchauffée à la pression $P_1 = 1.5$ bars.
- ✓ Au point 2, le fluide est sous forme de Vapeur surchauffée à la pression $P_2 = 8$ bars.
- ✓ Au point 3, le fluide est sous forme de Liquide à $T_3 = 0^\circ\text{C}$.
- ✓ Aux bornes du composant C3 la transformation est **Isenthalpique**.
- ✓ Aux bornes des deux composantes C2 et C4, les transformations sont **Isothermes**, et s'effectuent à la température T_{c2} pour la transformation 2-3, et à la température T_{c4} pour la transformation 4-1
- ✓ Lors de la transformation 4-1, le composant C4 échange une quantité massique de chaleur $Q_{1,4}$ avec le milieu extérieur : $Q_{1,4} = 12.54$ KJ/kg
- ✓ Le seul travail mis en jeu dans le composant C1.

Questions

1. Citer le composant de chaque case
2. Tracer le cycle frigorifique sur le diagramme Enthalpie
3. Remplir le tableau ci-dessous

Points	Température T (°C)	Pression P (bar)	Enthalpie h (KJ/kg)
1			
2			
3			
4			

4. Calculer le débit masse du fluide circulant dans l'installation
5. Calculer la puissance $Q_{2,3}$ du condenseur et le travail du compresseur

Exercices 3

Un climatiseur fonctionne avec le fréon R410A, le parcours du fluide est évolué entre deux valeurs de pressions BP = 4 bar, et HP = 30 bar, la température du gaz à l'aspiration du compresseur T1= -10°C, et celle à l'entrée du détendeur T5 = 45°C. le débit massique du fluide $\dot{m} = 1,5$ Kg/s

Questions

1. Tracer le cycle de parcours du fluide sur le diagramme enthalpique
2. Compléter le tableau ci-dessous
3. Donner les valeurs de : Sous-refroidissement, et Surchauffe
4. Calculer les différentes puissances du circuit

Points	Température T (°C)	Pression P(bar)	Enthalpie h (KJ/kg)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

Exercice 4

On réalise une machine frigorifique dont le fluide frigorifique est le fréon. Le schéma de cette machine est le suivant (Fig.1). Le diagramme de Mollier (enthalpie – pression) du fréon représenté ci-dessous (Fig. 2) sera utilisé pour tracer le cycle frigorifique de cette machine.

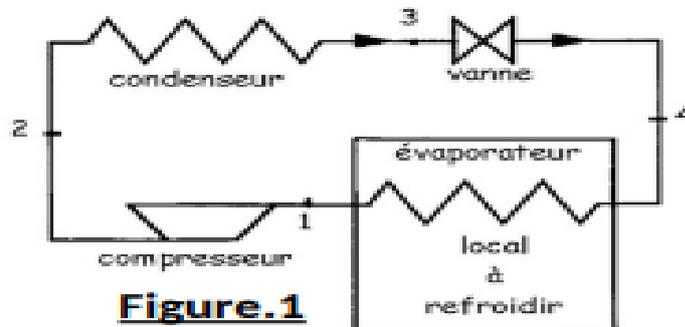


Figure.1

I. La vapeur est comprimée isentropiquement de **2.7 bars** à **8 bars** dans le compresseur. Elle subit ensuite une transformation isobare dans le condenseur jusqu'à liquéfaction totale (trajet 2-3), puis une détente isenthalpique de **8** à **2,7 bars** par le détendeur (trajet 3-4), et enfin une transformation isobare dans l'évaporateur du local à refroidir (trajet 4-1).

✓ Questions

1. Quelles sont les indications (paramètres) fournies par le diagramme de Mollier du fréon ? Tracer le cycle des transformations 1-2-3-4-1 sur ce diagramme.
2. Calculer la variation de l'enthalpie massique du fluide au cours de l'évaporation. En déduire la quantité de chaleur retirée du local à refroidir par unité de masse de fluide.
3. Calculer la variation d'enthalpie massique du fluide au cours de la compression. En déduire le travail massique de compression.
4. Calculer l'efficacité de ce cycle. Et rétablir l'efficacité théorique d'une machine frigorifique réversible fonctionnant entre les mêmes températures (T_3 et T_4).
5. La production frigorifique à l'évaporateur étant de **120 000 kJ/h** (soit 120 000 kJ retirés au local à refroidir) Calculer le débit du fréon. Quelle est la puissance mécanique de l'installation ?

II. Pour améliorer les performances de la machine frigorifique fonctionnant entre les mêmes pressions, on réalise un "sous-refroidissement" isobare 3-3' du liquide avant la détente. La température du liquide est alors abaissée à **-5°C**. et une surchauffe isobare 1-1' du gaz avant le compresseur. la température du gaz est augmentée avec un écart de **10°C**

1. Placer les points 1' et 3' sur le diagramme de Mollier.
2. Après la détente isenthalpique le fluide est à l'état 4' Placer ce point sur le diagramme.
3. Après la compression le fluide est à l'état 2', Placer ce point sur le diagramme
Tracer (en couleurs) le cycle des transformations de la nouvelle machine.
4. Donner les valeurs des écarts de la surchauffe et du refroidissement.

5. On maintient le même débit. Calculer la nouvelle production frigorifique. Comparer cette installation à la précédente (puissance frigorifique, travail du compresseur, efficacité).
6. On maintient le même débit. Calculer la nouvelle production frigorifique. Comparer cette installation à la précédente (puissance frigorifique, travail du compresseur, efficacité).