

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

3^{ème} Année Licence

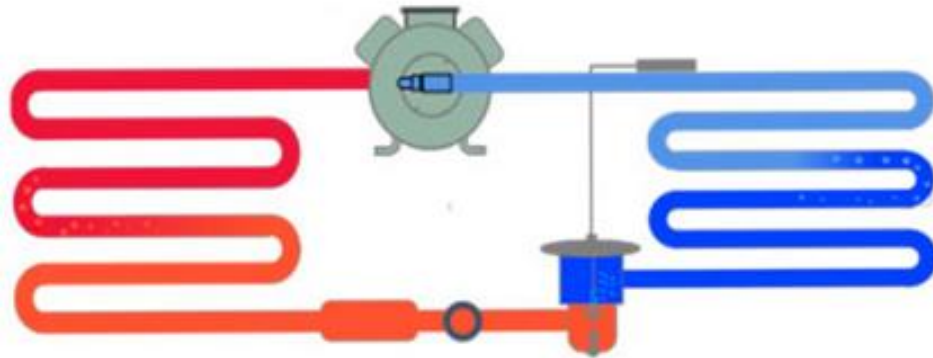
Spécialité : Energétique

Polycopié du cours pour l'enseignement de la matière

Machines Frigorifiques et pompe à chaleur

Dr. MANSOURI KHALED

Maître de conférences « B »



2023

Avant-propos

Chers étudiants et passionnés de la matière machine frigorifique et pompe à chaleur,

C'est avec un grand enthousiasme que je vous présente ce manuscrit de cours dédié à la troisième licence énergétique, centré sur l'étude approfondie des machines frigorifiques et des pompes à chaleur. Au fil des pages de ce manuscrit, vous plongerez dans l'univers captivant de ces technologies essentielles qui jouent un rôle fondamental dans notre quête continue d'efficacité énergétique et de confort thermique.

La réfrigération et la thermodynamique sont des domaines en constante évolution, où la science et l'ingénierie se rejoignent pour résoudre des défis complexes et relever les enjeux environnementaux contemporains. Les machines frigorifiques et les pompes à chaleur, au-delà de leur aspect pratique dans notre vie quotidienne, sont des pierres angulaires de la durabilité énergétique et de la préservation de notre planète. Elles nous permettent de maintenir des températures optimales, que ce soit pour conserver nos aliments, maintenir des conditions de travail confortables ou encore participer à la transition vers des sources d'énergie renouvelables.

Ce manuscrit a été soigneusement conçu pour vous fournir une base solide dans la compréhension de ces systèmes thermodynamiques complexes. Nous explorerons ensemble les principes fondamentaux qui sous-tendent le fonctionnement des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, en examinant leurs cycles, leurs composants clés et leurs applications variées. De la théorie à la pratique, nous aborderons également les aspects techniques, les considérations environnementales et les innovations récentes qui redéfinissent le paysage de ces technologies.

J'espère sincèrement que ce manuscrit de cours vous offrira une expérience d'apprentissage enrichissante et stimulante. Que vous soyez débutants ou que vous ayez déjà une connaissance préalable de la matière, j'espère que ce manuscrit vous aidera à approfondir vos compétences et à développer votre passion pour les machines frigorifiques et les pompes à chaleur. Puissiez-vous trouver dans ces pages la clarté, l'inspiration et la motivation nécessaires pour relever les défis à venir et contribuer à façonner un avenir énergétique plus durable.

MANSOURI KHALED

Maitre de Conférences au Département Génie Mécanique

Faculté de Technologie

Université Echahid Hamma Lakhdar

El-Oued

Table des matières

Avant-propos	i
Table des matières	iii
I Chapitre I : Généralités	1
I.1 La Machine Frigorifique : Essence de la Thermodynamique Réceptive.....	1
I.2 Historique du froid.....	2
I.2.1 Généralités sur le froid	2
I.2.2 Applications industrielles du froid	2
I.2.3 Production de froid.....	2
I.2.4 L'apparition des divers systèmes frigorifiques	3
I.2.5 Éléments de physique.....	3
I.3 Cycle frigorifique de Carnot.....	8
I.4 Coefficient de performance	10
I.4.1 Machine consommant de l'énergie mécanique	10
I.5 Rendement du cycle.....	12
Exercices.....	13
II Chapitre II : Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à compression de vapeur ..	15
II.1 Représentation du cycle thermodynamique (diagrammes T-s et P-h).....	15
II.1.1 Diagramme entropique entropie-température (T-s)	15
II.1.2 Diagramme de Mollier enthalpie-pression (P-h).....	16
II.1.3 Cycle frigorifique	16
II.1.4 Représentation du cycle frigorifique théorique	17
II.1.5 Cycle théorique	17
II.1.6 Cycle pratique	19
II.2 Bilan thermique du cycle	20
II.3 Coefficient de performances (COP)	21
Exercices.....	22
III Chapitre III : Composants d'une machine frigorifique à compression de vapeur.....	28
III.1 Introduction.....	28
III.2 Le compresseur	29
III.3 Le condenseur	29
III.4 Le détendeur	30

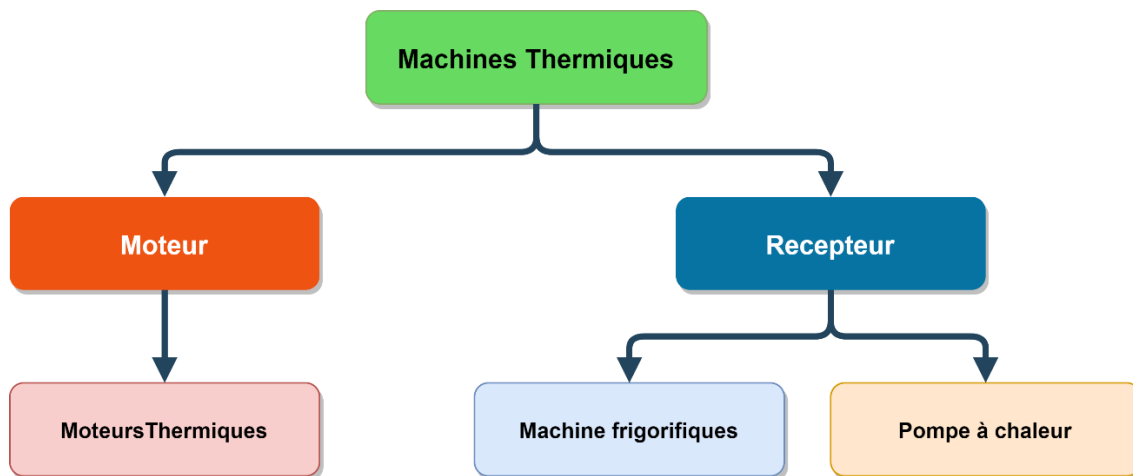
III.5 L'évaporateur.....	30
IV Chapitre IV : Autres types de machines frigorifiques	32
IV.1 Introduction.....	32
IV.2 Machines frigorifiques à absorption	32
IV.2.1 Principe de fonctionnement.....	32
IV.2.2 Cycle frigorifique à absorption	33
IV.2.3 Avantages et inconvénients.....	34
IV.2.4 Applications	34
IV.2.5 Coefficient de performance	35
IV.3 Cycle frigorifique à air.....	35
IV.3.1 Principe de fonctionnement.....	36
IV.3.2 Coefficient de performance.....	37
Exercices.....	39
V Chapitre V : Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur.....	40
V.1 Introduction.....	40
V.2 Pompes à chaleur : quelles sources d'énergie ?.....	40
V.3 Types des pompes à chaleur	41
V.4 Le coefficient de performance	43
Exercices.....	45
Références Bibliographique	46

Chapitre I : Généralités

I.1 La Machine Frigorifique : Essence de la Thermodynamique Réceptive

La machine frigorifique occupe une place centrale et fascinante dans le domaine de la thermodynamique, en particulier en tant que dispositif récepteur. Son rôle essentiel réside dans sa capacité à extraire la chaleur d'une source froide et à la transférer vers une source chaude en utilisant un travail extérieur. Cette action apparente à rebours de la chaleur défie notre intuition, mais s'aligne parfaitement avec les principes fondamentaux de la thermodynamique.

Grâce à l'utilisation astucieuse de fluides frigorigènes et de cycles thermodynamiques sophistiqués tels que le cycle de compression-détente, la machine frigorifique peut maintenir des températures basses dans des environnements contrôlés, tout en extrayant la chaleur de ces espaces vers l'extérieur. Cela trouve une pertinence particulière dans le stockage et la conservation d'aliments, les applications médicales, la climatisation et bien plus encore. La position de la machine frigorifique en thermodynamique reflète sa capacité à transformer l'énergie thermique en travail mécanique, élargissant ainsi nos horizons en matière d'efficacité énergétique et de confort thermique.



I.2 Historique du froid

I.2.1 Généralités sur le froid

On distingue dans le domaine du froid deux domaines distincts :

- La réfrigération qui consiste produire et maintenir une température inférieure la température ambiante
- La cryophysique, qui est la science des propriétés de la matière très basse température (Conventionnellement le domaine cryogénique correspond aux températures inférieures à $120\text{ K} = -153,15\text{ °C}$).

I.2.2 Applications industrielles du froid

- Domaine médical : cryochirurgie, conservation de certains produits, organes...
- Industries alimentaires : conservation des aliments, pasteurisation des liquides.
- Industries chimiques et pétrochimiques : liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinage, débenzolage...
- Génie civil refroidissement des bétons, congélation des sols aquifères...
- Conditionnement des locaux : rafraichissement de l'air, conditionnement des patinoires, canons neige...
- Laboratoires d'essai et de recherche étude des matériaux et comportement de matière très basse température...

I.2.3 Production de froid

Toute transformation endothermique peut constituer un procédé capable de produire du froid soft.

- Fusion d'un solide,
- Sublimation d'un solide
- Vaporisation d'un liquide
- Détente d'un gaz

Si l'on désire une production **continue** de froid, il est nécessaire de réaliser un **cycle**, c'est à dire de combiner un phénomène exothermique à un phénomène endothermique. Les machines frigorifiques seront donc au moins bithermes.

I.2.4 L'apparition des divers systèmes frigorifiques

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

I.2.4.1 Systèmes mécano-frigorifiques

Parmi eux, deux familles se détachent :

- Les systèmes à compression de vapeurs liquéfiables,
- Les systèmes utilisant des cycles à gaz

I.2.4.2 Systèmes thermo-frigorifiques

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

- Les systèmes à absorption,
- Les systèmes à adsorption et thermo-chimiques
- Les systèmes à éjection

I.2.5 Éléments de physique

I.2.5.1 La température

Le chaud et le froid sont appréciés par des sensations d'où une évaluation irrationnelle de ces grandeurs.

Aussi, il a été défini la température qui permet une objectivité des mesures. La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre.

Les températures dans le S.I. sont exprimées en (degrés Celsius) mais dans la littérature, on rencontre les degrés Fahrenheit (F) et les degrés Kelvin (K)

Conversion entre les différentes unités de températures :

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32), \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32, \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

La chaleur est une forme d'énergie (énergie de mouvement des molécules) qui va d'un point chaud (température plus élevée) vers un point froid (température moins élevée). C'est la sensation perçue par nos organes de sens lorsque nous sommes placés devant un corps incandescent par exemple.

L'unité légale est le Joule (J) mais la kcal (kilo-Calorie) est également utilisée. Une kcal est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un kg d'eau pour augmenter sa température de 1°C.

Conversion d'unités

$$1 \text{ kcal} = 4,185 \text{ kJ} = -1 \text{ Fg (frigorie)}$$

$$1 \text{ thermie (Th)} = 1000 \text{ kcal} = 4,185 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ BTU} = 1,053 \text{ kJ (BTO: British Thermal unit)}$$

I.2.5.2 La puissance

La puissance est le rapport de l'énergie fournie ou absorbée sur l'unité de temps. L'unité légale est le Watt (W).

Conversion d'unités :

$$1 \text{ kW} = 860 \frac{\text{kCal}}{\text{h}}$$

$$1 \frac{\text{kCal}}{\text{h}} = -1 \frac{\text{Fg}}{\text{h}} = 1,163 \text{ W}$$

$$1 \text{ cv (cheval)} = 736 \text{ W}$$

I.2.5.3 La pression

L'unité légale de la pression est le Pascal (Pa) qui est égal à la pression uniforme exercée par une force de 1 N (Newton) sur une surface de 1 m².

L'unité de pression couramment utilisée par les frigoristes est le Bar et il faut distinguer :

Les appareils de mesure des pressions (appelés manomètres) sur les systèmes frigorifiques qui sont gradués généralement en pression relative (par rapport à la pression atmosphérique) les appareils de mesures du vide (appelés vacuomètres) sur les systèmes frigorifiques qui sont gradués en pression absolue (par rapport au vide absolu).

Conversion d'unités

$$1 \text{ Bar} = 105 \text{ Pa} = 1.02 \text{ kg/m}^2 = 0.986 \text{ atm} = 750 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ Bar} = 14,54 \text{ PSI} = 10.2 \text{ mCE (mètre de colonnes d'eau)}$$

PSI : Pound per Square Inch (Livre par Pouce carré)

I.2.5.4 Le changement d'état

La maîtrise des deux états de la matière que sont la phase liquide et la phase vapeur est primordiale en froid.

Le changement d'état se définit comme la phase de transformation d'une phase vers une autre phase.

La figure I.1 donne les différents changements d'état possibles de la matière.

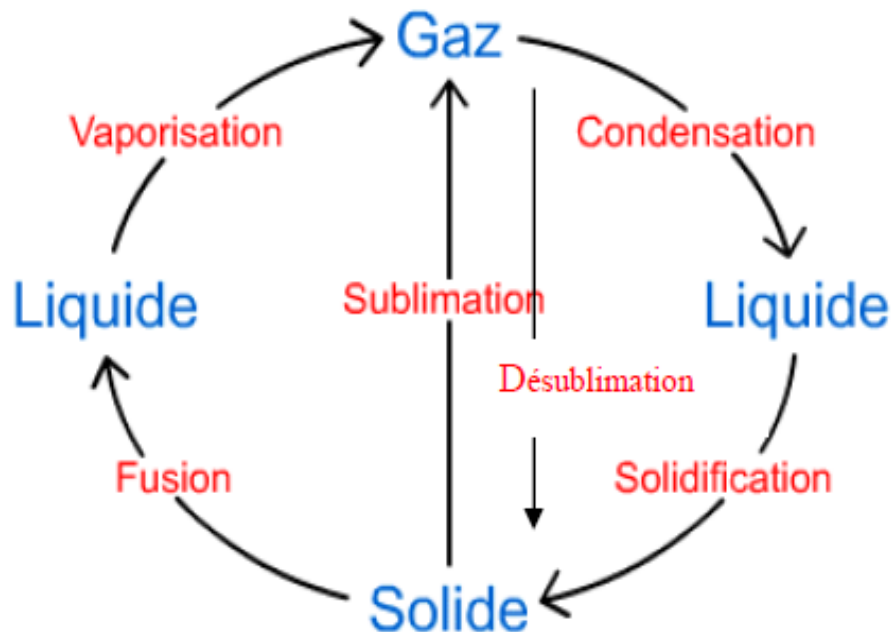


Figure I-1 Changements d'états de la matière.

A titre d'exemple, il sera rappelé les changements d'état pour l'eau. Ces changements sont les suivants :

- Le passage de l'état solide (glace) à l'état liquide, appelé la fusion
- Le passage de l'état liquide à l'état solide (glace), appelé la congélation (ou solidification)
- Le passage de l'état liquide à l'état liquide à l'état vapeur, appelé la vaporisation (ou l'ébullition ou encore l'évaporation)
- Le passage de l'état vapeur à l'état liquide, appelé la liquéfaction (ou condensation)

Ainsi sont définis les termes suivants

La chaleur latente de congélation ou chaleur latente de fusion suivant qu'on passe de la phase liquide vers la phase solide ou vice versa ; pour l'eau cette chaleur latente est de 334.8 kJ/kg (80 kCal/kg) à la pression atmosphérique, la température de congélation étant de 0C à cette pression

La chaleur latente de vaporisation ou de condensation suivant qu'on passe de la phase liquide à la phase vapeur ou vice versa ; pour l'eau cette chaleur latente est de 2254.7 kJ/kg (539 kCal/kg) à la pression atmosphérique, la température d'évaporation étant de 1000 à cette pression

Comme autres changements d'état, il faut citer :

- La sublimation (passage de l'état solide à l'état vapeur)
- La désublimation (passage de l'état vapeur à l'état solide)

En rappel, il existe pour tout corps pur, une relation pression température si et seulement si la vapeur est contact avec le liquide qui lui a donné naissance.

A chaque corps correspond une courbe de changement d'état représenté dans le diagramme thermodynamique pression - enthalpie (P-h) appelé diagramme enthalpique ou diagramme de Mollier des frigoristes.

Ce diagramme est utilisé pour l'étude des cycles de réfrigération.

Les autres diagrammes thermodynamiques ne sont pratiquement pas utilisés par les frigoristes.

Le diagramme Température - entropie (T-s) est utilisé à des fins pédagogiques ou lorsqu'on veut concevoir un procédé (applications aux machines thermiques).

Le diagramme enthalpie - entropie (h-s) aussi appelé diagramme de Mollier des motoristes est utilisé pour l'étude des cycles moteurs à vapeur.

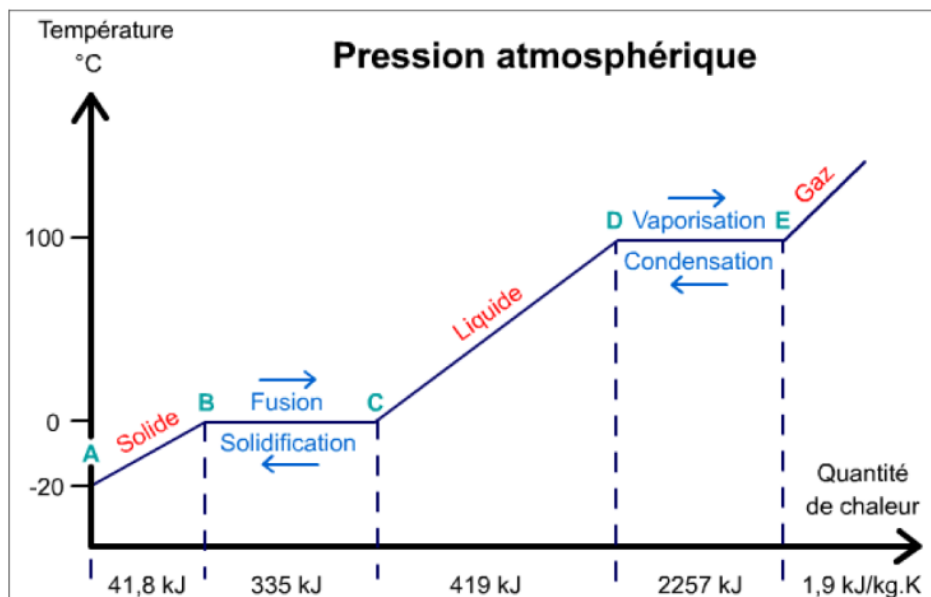


Figure I-2 Changement d'état de l'eau.

A-B : La température de la glace augmente régulièrement pour atteindre 0°C. La chaleur apportée et nécessaire à cette étape est de 41,8 kJ. C'est de la chaleur sensible (la température augmente).

En B : On a un bloc de glace de 1 kg à 0°C.

B - C : A 0°C, la 1^{ère} goutte de liquide apparaît et la glace commence à fondre. Pendant toute la fonte de la glace, le mélange liquide/solide aura une température rigoureusement égale à 0 °C. La chaleur apportée est de 335 kJ, c'est de la chaleur latente (la température reste constante).

En C : On a 1kg d'eau entièrement liquide à 0°C.

C - D : La température de l'eau s'élève progressivement jusqu'à atteindre 100°C. Pour réaliser cette augmentation de température, nous devons apporter 419 kJ. C'est de la chaleur sensible.

En D : On a 1kg d'eau entièrement liquide à 100 °C, c'est du liquide saturé.

D - E : A 100 °C, comme nous continuons à apporter de la chaleur, l'eau se met à bouillir et la première molécule de vapeur apparaît. C'est le début de l'évaporation. La température reste constante pendant tout le changement d'état. Quand la dernière goutte de liquide s'évapore, le changement d'état sera terminé, nous aurons apporté 2257 kJ de chaleur latente.

I.3 Cycle frigorifique de Carnot

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

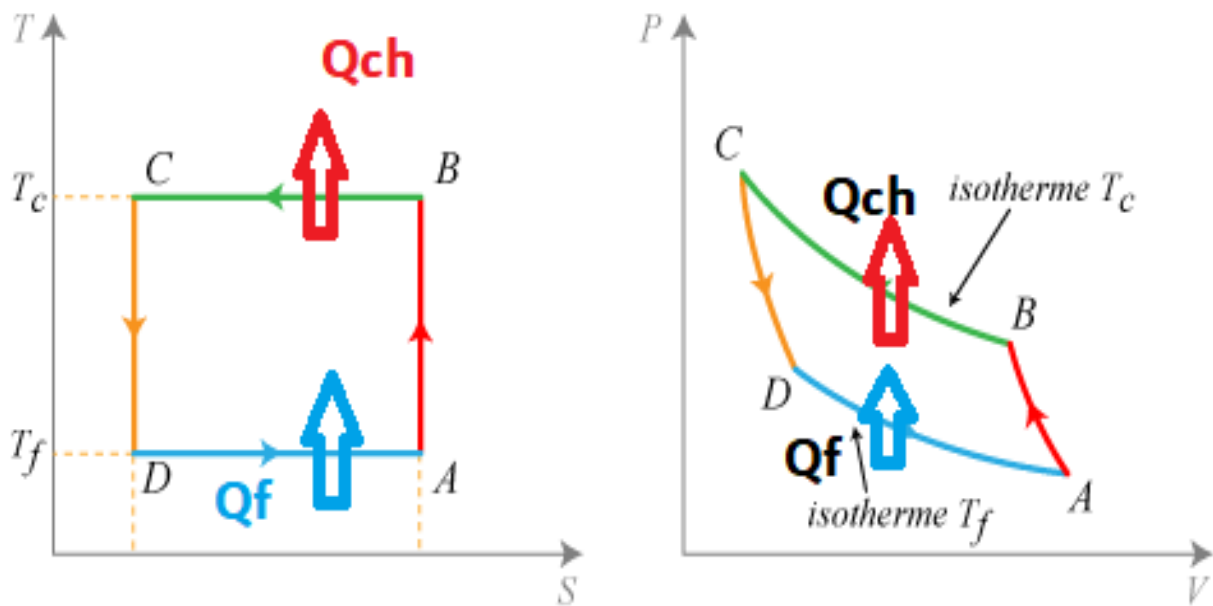


Figure I-3 Cycle de Carnot Inverse

1er principe : $W + Q_f + Q_{ch} = 0$

2e principe : $Q_f = T_f (S_A - S_D)$ et $Q_{ch} = T_c (S_C - S_B)$

$$\text{Or } S_A = S_B \text{ et } S_D = S_C$$

soit :

$$W = -(Q_f + Q_{ch})$$

$$W = -(T_f (S_A - S_D) + T_c (S_c - S_B))$$

$$W = -(T_f (S_A - S_D) + T_c (S_D - S_A))$$

$$W = -(S_A - S_D) (T_f - T_c)$$

or : $S_D < S_A$ et $T_f < T_c$ et donc : $W > 0$

Le système reçoit le travail W , prend la chaleur Q_f a la source froide et cède la quantité de chaleur Q_{ch} a la source chaude.

Caractéristiques du cycle frigorifique

- Source froide :

Q_f : chaleur absorbée par le fluide au cours d'un cycle [J].

q_f : chaleur absorbée par kg de fluide $\left[\frac{J}{kg}\right]$.

- Source chaude :

Q_{ch} : chaleur cédée par le fluide au cours d'un cycle [J].

q_{ch} : chaleur cédée par kg de fluide $\left[\frac{J}{kg}\right]$.

- Travail mécanique W [J] et w travail mécanique massique $\left[\frac{J}{kg}\right]$.

- Soit τ la durée d'un cycle :

$P_f = \left|\frac{Q_f}{\tau}\right|$ Puissance frigorifique [W].

$P_{ch} = \left|\frac{Q_{ch}}{\tau}\right|$ Puissance calorifique [W].

$$P_m = \left| \frac{W}{\tau} \right| \quad \text{Puissance mécanique [W].}$$

- soit \dot{m} le débit massique de fluide :

$$P_f = \dot{m} \cdot q_f \quad \text{Puissance frigorifique [W].}$$

$$P_{ch} = \dot{m} \cdot q_{ch} \quad \text{Puissance calorifique [W].}$$

$$P_m = \dot{m} \cdot w \quad \text{Puissance mécanique [W].}$$

I.4 Coefficient de performance

Pour caractériser l'efficacité d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur, on considère, respectivement :

- le coefficient de performance frigorifique :

$$COP_F = \frac{\textit{froid produit à la source froide}}{\textit{énergie apportée au système}}$$

- le coefficient de performance calorifique :

$$COP_c = \frac{\textit{chaleur dégagée au puits chaud}}{\textit{énergie apportée au système}}$$

Ces rapports adimensionnels sont objectivement des rendements, mais on évite de leur donner ce nom pour ne pas choquer les habitudes car ils ont très souvent des valeurs supérieures à l'unité, contrairement aux rendements des machines thermiques produisant de l'énergie mécanique.

I.4.1 Machine consommant de l'énergie mécanique

La Figure I-4 schématise un tel système. Grâce à l'énergie mécanique (ou équivalente) W fournie à ce système, on absorbe à la source froide, à la température thermodynamique T_F , l'énergie thermique Q_F et on rejette au puits chaud, à la température T_{ch} , l'énergie thermique Q_{ch} . Au lieu de considérer les énergies, on peut s'intéresser aux puissances mises en œuvre. Du fait de la puissance mécanique fournie P_m , on produit, à la source froide, une puissance frigorifique P_f et on rejette au puits chaud une puissance calorifique P_{ch} .

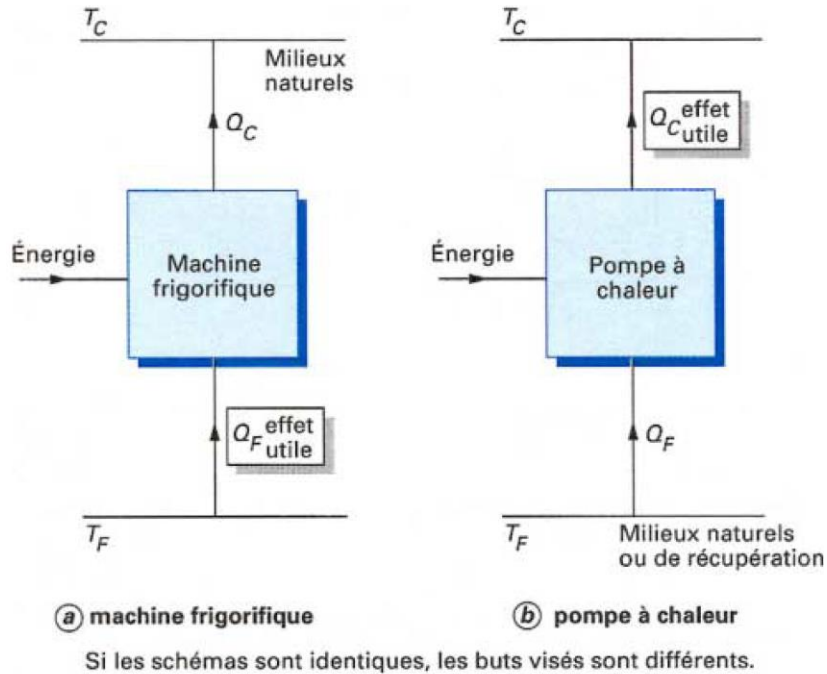


Figure I-4 Principe d'une machine frigorifique et d'une pompe à chaleur

Selon le premier principe :

$$Q_F + Q_C + W = 0$$

$$W = -Q_C - Q_F$$

Le coefficient de performance frigorifique COP_F d'une machine frigorifique ditherme est:

$$COP_F = \frac{Q_F}{-Q_C - Q_F} = \frac{1}{-\frac{Q_C}{Q_f} - 1}$$

Il peut être supérieur, égal ou inférieur à 1 selon les conditions de fonctionnement du système.

Le coefficient de performance calorifique COP_C d'une pompe à chaleur ditherme est :

$$COP_C = \frac{-Q_C}{-Q_C - Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

On vérifie aisément que :

$$COP_C = COP_F + 1$$

Le coefficient de performance calorifique d'une pompe à chaleur est toujours supérieur à 1.

Pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) ditherme réversible, donc thermodynamiquement idéale, on doit satisfaire à

La relation de Clausius :

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} = -\frac{Q_c}{T_c} \Rightarrow \frac{Q_c}{Q_f} = -\frac{T_c}{T_f}$$

Dans ce cas, les coefficients de performance frigorifique et calorifique de ces systèmes idéaux deviennent :

$$COP_F = \frac{T_f}{T_{ch} - T_f} \text{ et } COP_C = \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_f}$$

I.5 Rendement du cycle

En pratique il apparait toujours des phénomènes irréversibles. Le travail W_{irr} nécessaire pour réaliser l'effet frigorifique Q_F est toujours supérieur au travail calculé théoriquement (Carnot) :

$$\frac{|Q_F|}{|W_{irr}|} < \frac{|Q_F|}{|W_{Th}|} \text{ donc } COP_{F_{irr}} < COP_{F_{rev}}$$

$$\eta = \frac{COP_{F_{irr}}}{COP_{F_{rev}}}$$

où $COP_{F_{rev}}$: Coefficient de performance de cycle de Carnot

Exercices

Changement de phase

Exercice I-1 :

Nous possédons $M_{ess} = 260 \text{ g}$ d'essence que l'on brûle pour échauffer $M = 4 \text{ kg}$ de glace initialement à -20°C sous la pression atmosphérique.

Quelle est la température finale de la vapeur obtenue ?

Données :

- Chaleur latente de fusion de la glace : $L_F = 352 \text{ kJ/kg}$
- Pouvoir calorifique de l'essence : $L_{ess} = 48.103 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Chaleur latente de vaporisation de l'eau : $L_V = 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Capacité calorifique massique de la glace : $C_{glace} = 2000 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$
- Capacité calorifique massique de l'eau : $C_{eau} = 4185,5 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$
- Capacité calorifique massique de la vapeur d'eau : $C_{vap} = 2020 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$

Exercice I-2 :

Une casserole contient 2.5 L d'eau à 10°C et sous la pression atmosphérique ambiante de 1 bar . On donne $L_V 56587 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ et 1 mole d'eau liquide occupe un volume de $0,018 \text{ L}$, $c = 4185 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$.

1. Combien faut-il de chaleur pour évaporer entièrement l'eau de la casserole d'eau ?
2. Représenter, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques), l'évolution de cette transformation sur les diagrammes T-V et P-V en y représentant la courbe de saturation.
3. Le réchauffement est effectué avec une plaque électrique de $\dot{Q} = 1500 \text{ W}$. Combien de temps faut-il pour vaporiser l'eau ?

Cycle de Carnot inverse

Exercice I-3 :

Une machine ditherme fonctionne suivant un cycle de Carnot inverse (par rapport au sens moteur) et entre les températures T_C et T_F des sources chaudes et froides.

1. Rappeler les transformations qui constituent un cycle de Carnot,
2. Tracer schématiquement ce cycle dans un diagramme (P, V) et (T, S). Indiquer les températures et le sens de parcours du cycle,
3. Sachant que de la chaleur est toujours prélevée de la source froide et donnée à la source chaude, localiser les sources chaudes et froides dans le cas : (i) d'un fonctionnement en réfrigérateur. (ii) d'un fonctionnement en pompe à chaleur (on considèrera des cas réalistes inspirés par les valeurs données pour l'application numérique),
4. Donner la définition des efficacités ϵ_r et ϵ_p de cette machine en modes respectivement réfrigérateur et pompe chaleur. Quelles sont leurs expressions en fonction des quantités de chaleur échangées ?
5. En écrivant l'expression de la variation d'entropie sur un cycle réversible, donner l'expression de ϵ_r et ϵ_p en fonction des températures. Faire l'application numérique et commenter le résultat

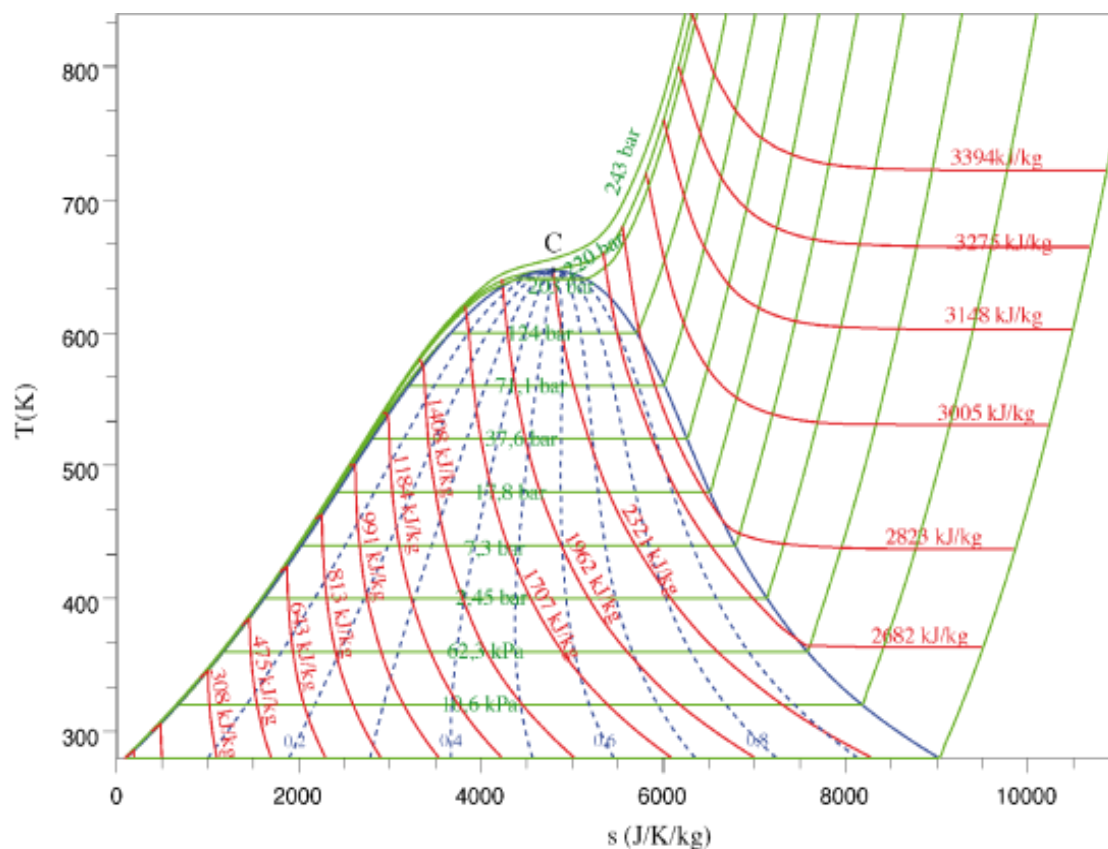
Pour l'application numérique. $T_C = 18\text{ °C}$ et $T_F = -5\text{ °C}$

Chapitre II : Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à compression de vapeur

II.1 Représentation du cycle thermodynamique (diagrammes T-s et P-h)

II.1.1 Diagramme entropie-entropie-température (T-s)

On porte la température en ordonnée, l'entropie en abscisse. L'origine des entropies est prise au point triple du fluide considéré, On retrouve sur le graphique la zone diphasique, dont le point critique est le sommet. Le domaine vapeur est bien sûr situé du côté des entropies élevées. Les iso-titres vapeur sont tracés en pointillés à l'intérieur du domaine diphasique, pour représenter les différentes températures de saturation du fluide frigorigène. Les lignes de température constante sont tracées de manière horizontale pour représenter les variations de température dans le système.



Propriétés du diagramme entropique :

- Un cycle de Carnot est représenté par un rectangle
- Les isobares et les isochores sont des exponentielles croissantes (loin du point critique, si l'on peut admettre que les capacités calorifiques ne dépendent pas de la température)
- la chaleur consommée dans une transformation réversible est égale à l'aire comprise entre la droite $T=0$ et la courbe décrivant la transformation.

II.1.2 Diagramme de Mollier enthalpie-pression (P-h)

On porte l'enthalpie en abscisse, la pression (ou son logarithme) en ordonnée.

Ce type de diagramme est surtout employé par les frigoristes. On y porte essentiellement les isothermes et les isentropiques.

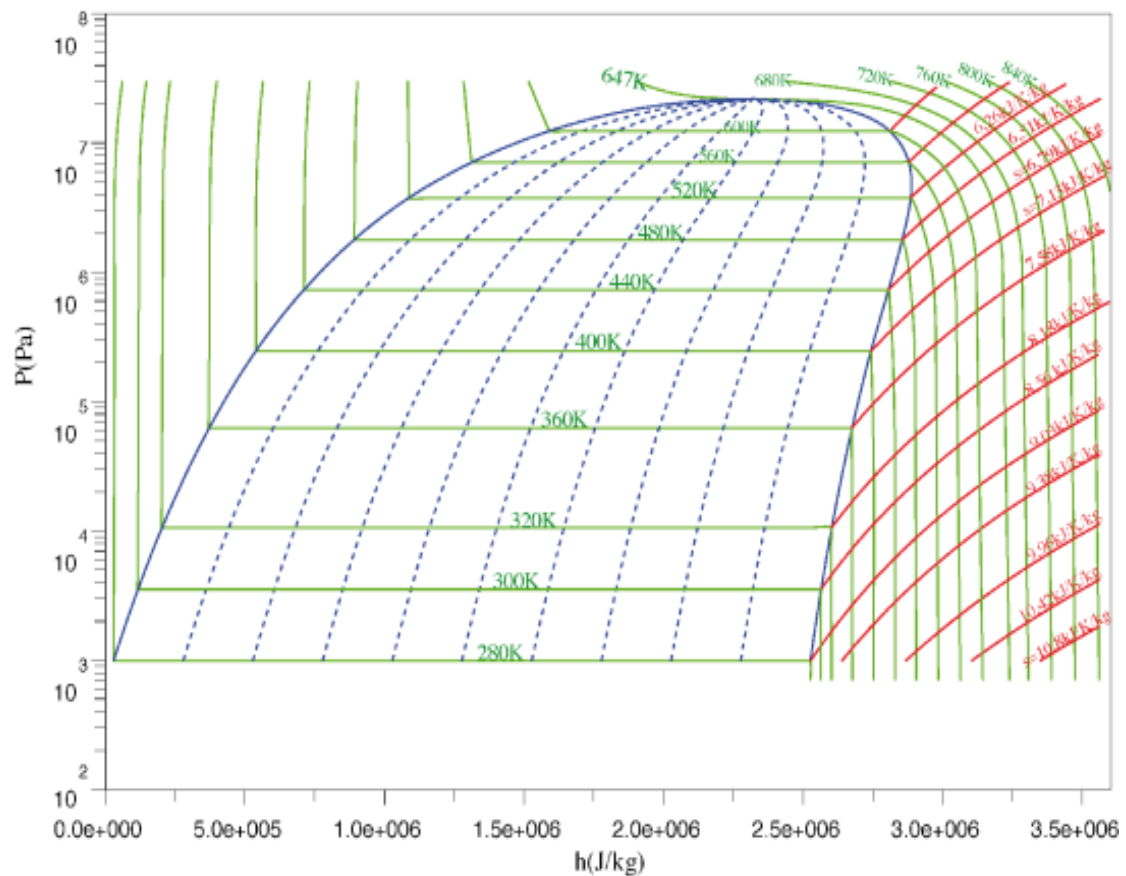


Figure II-2 Diagramme enthalpie-pression de l'eau

II.1.3 Cycle frigorifique

Description du cycle :

- Le fluide sort de l'évaporateur sous forme de vapeur saturante sèche à l'état 1
- Il subit dans le compresseur, une compression adiabatique réversible qui l'amène à l'état 2

- La vapeur subit dans le condenseur une transformation à pression constante : refroidissement jusqu'à la température, puis liquéfaction totale à cette température (état 3).
- Le liquide passe dans le détendeur et y subit une détente isenthalpique qui le ramène à la pression initiale (état 4).
- La vaporisation du liquide restant se termine dans l'évaporateur pour un retour à l'état 1.

II.1.4 Représentation du cycle frigorifique théorique

Le cycle frigorifique est composé des transformations suivantes :

- Une compression polytropique (adiabatique pour le cycle théorique),
- Une condensation isobare,
- Une détente isenthalpique,
- Une vaporisation isobare.

II.1.5 Cycle théorique

Hypothèse :

La fin des changements d'état se situe exactement à la sortie des échangeurs : Point A en $x = 1$ et point C en $x = 0$.

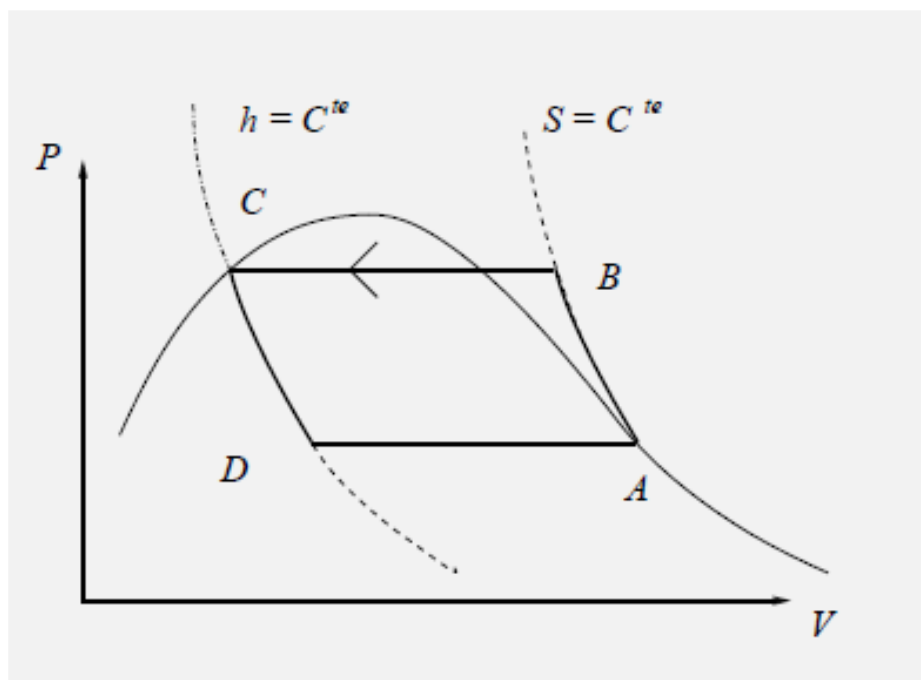


Figure II-3 Cycle théorique dans le diagramme Clapeyron

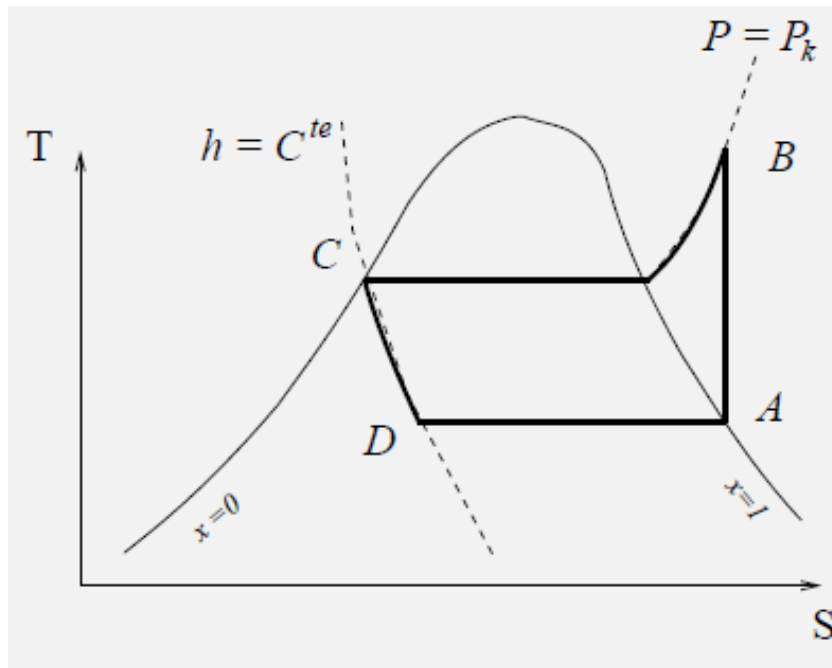


Figure II-4 Cycle théorique dans le diagramme T-S

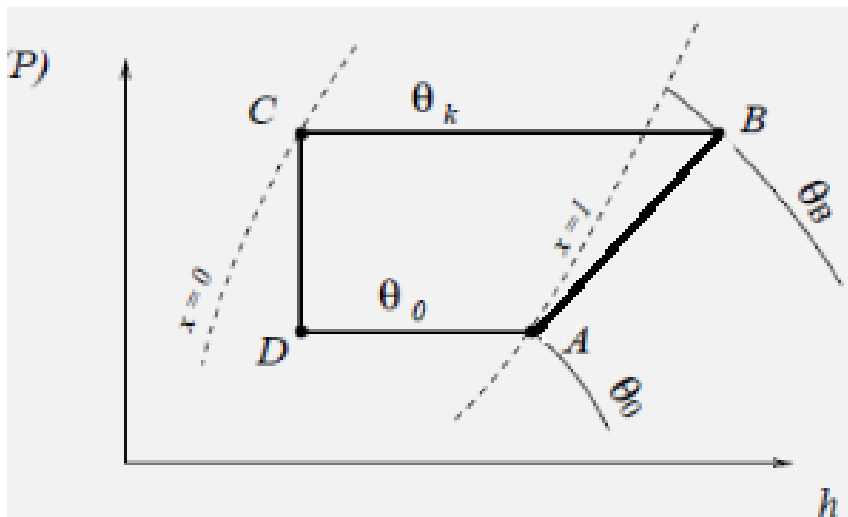
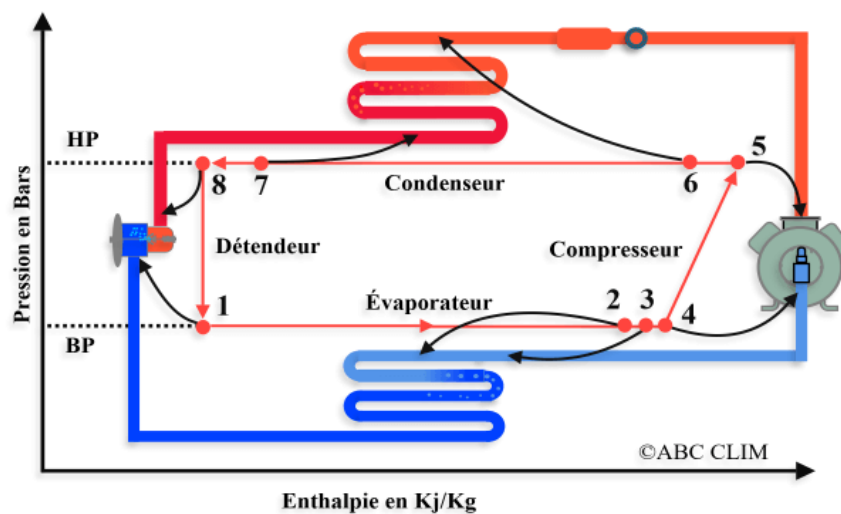
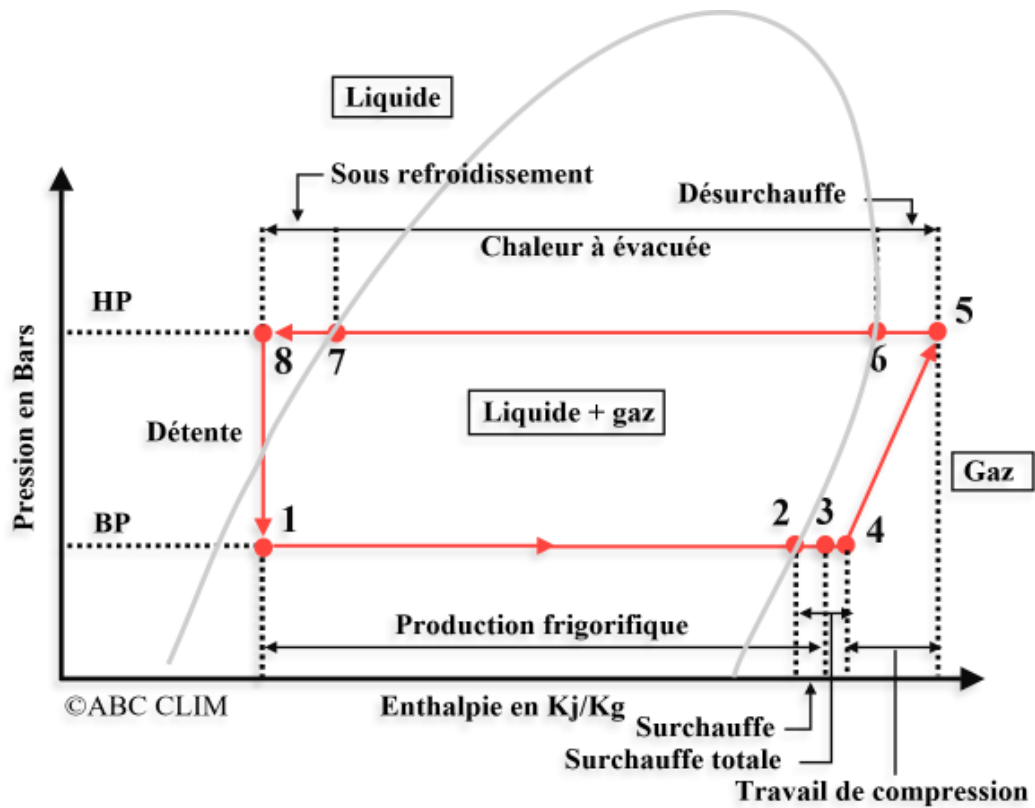


Figure II-5 Cycle théorique dans le diagramme P-h

II.1.6 Cycle pratique



1 à 2 : Le fluide s'évapore sa température et sa pression ne changent, mais son enthalpie augmente (quantité de chaleur). C'est la phase à laquelle le fluide capte les calories du milieu à refroidir.

État du fluide entré : mélange liquide vapeur

État du fluide sorti : vapeur surchauffée basse pression

2 à 3 : Ici c'est la fin de l'évaporateur cette zone sert à surchauffer le gaz afin d'être certain que tout le fluide soit évaporé.

4 à 5 : Le gaz est comprimé, l'augmentation de la pression s'accompagne d'une augmentation de température.

État du fluide entré : vapeur basse pression surchauffée

État du fluide sorti : vapeur haute pression surchauffée

5 à 6 : C'est la zone de la désurchauffe

6 à 7 : Le fluide passe à l'état liquide dans le condenseur sa pression ne change pas, cette condensation qui s'effectue à une température plus élevée et il permet de céder de la chaleur, l'enthalpie diminue.

État du fluide entré : vapeur haute pression surchauffée

État du fluide sorti : liquide haute pression sous-refroidi

7 à 8 : Zone du sous refroidissement

8 à 1 : Le fluide se détend par laminage (abaissement brusque de la pression) à travers un orifice, une partie du fluide se vaporise.

État du fluide entré : liquide haute pression

État du fluide sorti : mélange liquide vapeur

Retour à l'étape 1 à 2

II.2 Bilan thermique du cycle

Utilisons l'expression du premier principe soit :

$$\Delta W_{mec} + \Delta Q = \Delta H$$

Soit en divisant par la masse totale du fluide :

$$\Delta w_{mec} + \Delta q = \Delta h$$

- Bilan de l'évaporateur ($w_{mec} = 0$, car l'évaporateurs ne fournit aucun travail au fluide) :

$$q_{evap} = q_f = h_A - h_D > 0 \text{ (Theorique)}$$

$$q_{evap} = q_f = h_4 - h_1 > 0 \text{ (Pratique)}$$

- Bilan du compresseur : si la compression est adiabatique alors ($q = 0$) :

$$w_{comp} = w_{mec} = h_B - h_A > 0 \text{ (Theorique)}$$

$$w_{comp} = w_{mec} = h_5 - h_4 > 0 \text{ (Pratique)}$$

- Bilan du condenseur ($w_{mec} = 0$) :

$$q_{cond} = q_{ch} = h_C - h_B < 0 \text{ (Theorique)}$$

$$q_{cond} = q_{ch} = h_8 - h_5 < 0 \text{ (Pratique)}$$

- Bilan du détendeur : $w_{mec} = 0, q = 0$

$$0 = h_D - h_C \text{ (Theorique)}$$

$$0 = h_1 - h_8 \text{ (Pratique)}$$

En sommant membre _a membre les équations il vient :

$$w_{comp} + q_f + q_{ch} = 0$$

II.3 Coefficient de performances (COP)

- Le coefficient de performance frigorifique :

$$COP_F = \frac{\text{froid produit à la source froide}}{\text{énergie apportée au système}} = \left| \frac{q_f}{w_{comp}} \right| = \frac{(h_A - h_D)}{(h_B - h_A)}$$

- Le coefficient de performance calorifique :

$$COP_c = \frac{\text{chaleur dégagée au puits chaud}}{\text{énergie apportée au système}} = \left| \frac{q_{ch}}{w_{comp}} \right| = \frac{-(h_C - h_B)}{(h_B - h_A)}$$

- Rendement par rapport cycle de Carnot

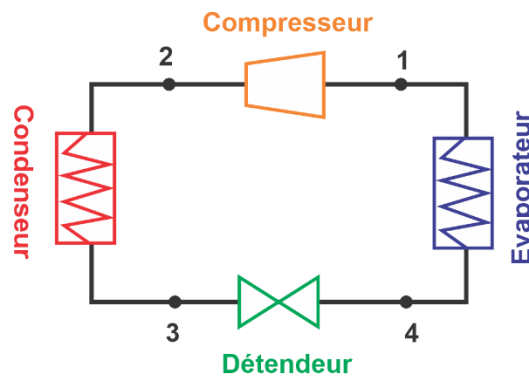
$$\eta_F = \frac{COP_F}{COP_{Carnot}}, \quad \eta_c = \frac{COP_c}{COP_{Carnot}}$$

Exercices

Exercice II-1

Celle-ci comprend principalement quatre éléments : un compresseur, un condenseur, un détendeur, un évaporateur.

Le cycle est supposé réversible. Le fluide frigorigène utilisé est l'ammoniac (R717). Il est considéré comme un gaz parfait à l'état gazeux.



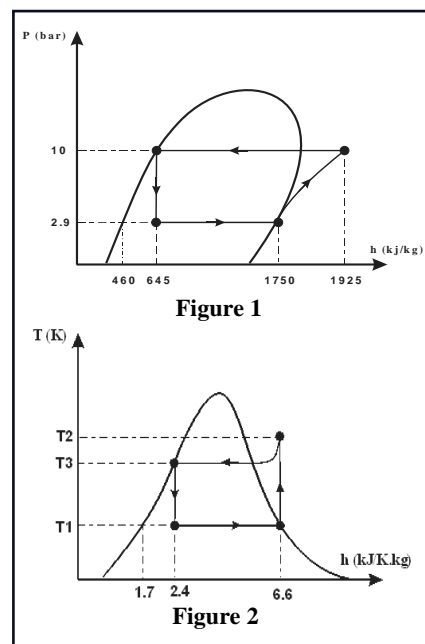
Données : $\gamma = 1.3$; Capacité thermique massique moyenne de l'ammoniac gazeux, à pression constante, entre les températures T_2 et T_3 : $c_p = 2,12 \frac{kJ}{kg.K}$.
Chaleur latente de vaporisation de l'ammoniac à $T_3 = 298 K$: $L_{V3} = 1.17 \frac{10^3 kJ}{kg}$.

Description du cycle :

- Le fluide sort de l'évaporateur sous forme de vapeur saturante sèche à l'état 1 : pression $P_1 = 2.9 \text{ bar}$, température $T_1 = 263 K$.
- Il subit dans le compresseur, une compression adiabatique réversible qui l'amène à l'état 2 : pression $P_2 = 10 \text{ bar}$, température T_2 .
- La vapeur subit dans le condenseur une transformation à pression constante : refroidissement jusqu'à T_3 , puis liquéfaction totale à cette température (état 3).
- Le liquide passe dans le détendeur et y subit une détente isenthalpique qui le ramène à la pression initiale $P_1 = P_4 = 2.90 \text{ bar}$ et à la température $T_4 = 263 K$ (état 4).

- La vaporisation du liquide restant se termine dans l'évaporateur pour un retour à l'état 1

1. Calculer la température T_2 en fin de compression.
2. Montrer que, dans le condenseur, la quantité de chaleur échangée par kilogramme de fluide est égale à $Q_{23} = -1280 \text{ kJ}$. Indiquer si la température du corps extérieur échangeant de la chaleur avec le fluide frigorigène est inférieure, égale ou supérieure à $T_3 = 298 \text{ K}$.
3. La quantité de chaleur échangée par kilogramme de fluide au niveau de l'évaporateur est $Q_{41} = 1105 \text{ kJ}$. Indiquer précisément dans quel sens a lieu l'échange de chaleur, et si la température du corps extérieur, échangeant de la chaleur avec le fluide frigorigène est inférieure, égale ou supérieure à $T_4 = 263 \text{ K}$.
4. A l'aide du premier principe de la thermodynamique, calculer le travail W échangé par kilogramme de fluide avec le milieu extérieur au cours du cycle.
5. Définir l'efficacité ou coefficient de performance de cette machine frigorifique.
6. Le cycle est représenté soit dans un diagramme enthalpique (figure 1), soit dans un diagramme entropique (figure 2).
 - a. Placer sur le diagramme de la figure 1 les états du fluide 1, 2, 3 et 4.
 - b. Représenter le cycle de cette machine frigorifique sur la figure 2.
 - c. A partir du diagramme approprié (figure ci-dessous), calculer les valeurs des quantités de chaleur Q_{23} , Q_{41} et du travail W échangé.



Exercice II-2

Une installation frigorifique fonctionne à l'ammoniac (R717), au régime nominal $-10^\circ \text{ C} / +30^\circ \text{ C}$. Elle développe une puissance frigorifique brute de 100 kW . La compression et la détente du R717 sont supposées respectivement parfaitement isentropes et isenthalpes. La surchauffe des vapeurs aspirées par le compresseur est de $+10^\circ \text{ C}$, et le sous-refroidissement du fluide frigorigène à l'état liquide en sortie de condenseur atteint la température $+25^\circ \text{ C}$. Par ailleurs, on

admettra que les changements d'état et de température du fluide caloporteur ont entièrement lieu à l'intérieur des échangeurs thermiques.

1. Tracer le schéma de l'installation en faisant figurer ses composants principaux, et tracer le cycle frigorifique sur le diagramme de Mollier du R717, et faire le lien entre les deux.
2. Indiquer l'intérêt de la surchauffe et du sous-refroidissement du fluide frigorigène.
3. Consigner dans un tableau les valeurs des pressions, températures, enthalpies et titres aux différents points du cycle.
4. Déterminer les grandeurs caractéristiques de cette installation frigorifique :
 - Débit massique du fluide frigorigène ;
 - Puissance mécanique théorique du compresseur ;
 - Puissance mécanique réelle du compresseur ;
 - Coefficient de performance (COP) théorique (de Mollier) et réel de l'installation ;
 - Efficacité par rapport au cycle de Carnot de la machine;
5. Calculer la puissance calorifique à évacuer au condenseur.

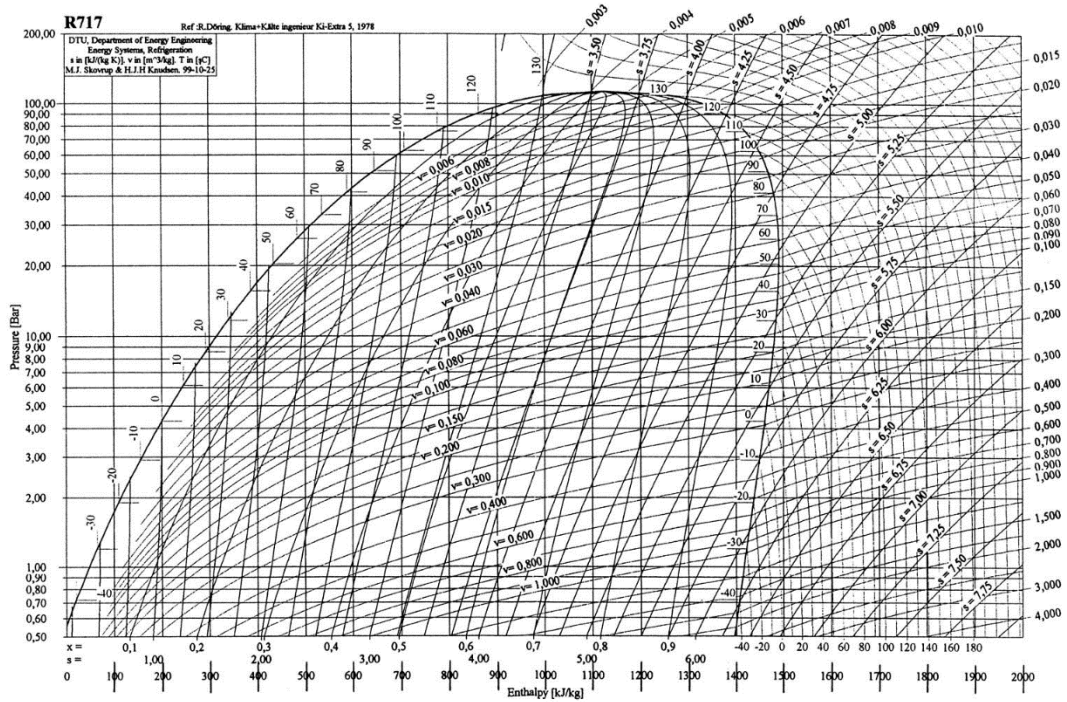
Données:

Le diagramme de Mollier du R717 ci-dessous.

Le travail de compression réel du compresseur vaut son travail de compression théorique divisé par les rendements indiqués η_i et mécanique η_m du compresseur. On considérera que le rendement indiqué η_i est égal au rendement volumétrique η_v du compresseur. Celui-ci s'exprime par

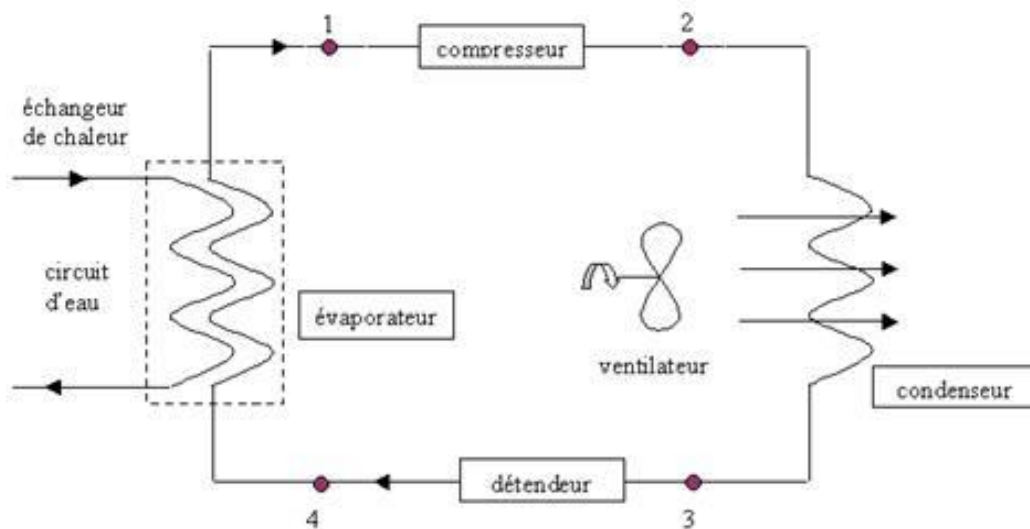
$$\eta_v = 1 - 0,05 \frac{P_c}{P_e}$$

Avec P_c et P_e les pressions respectivement au condenseur et à l'évaporateur. Le rendement $\eta_m = 0,90$



Exercice II-3

On s'intéresse à un système de production d'eau glacée dont le schéma de principe est donné ci-dessous



Le fluide frigorigène utilisé est le R12. A l'état gazeux, il sera considéré comme un gaz parfait dont les constantes sont $r=68.8 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et $\gamma=C_p/C_v=1.2$

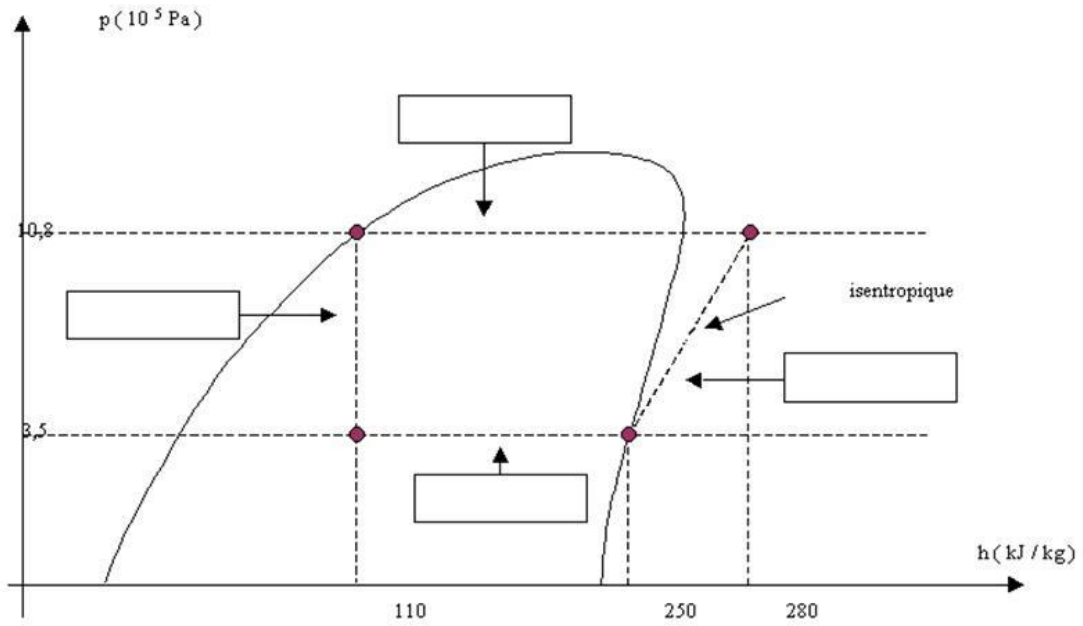
Le cycle théorique est le suivant (on n'envisage pas les surchauffes et les sous-refroidissements) :

- En 1, le fluide est entièrement gazeux : $P_1=3,5$ bar et $T_1=5^\circ\text{C}$. Il subit, alors, une compression adiabatique qui l'amène à la pression $P_2=10,8$ bar et à la température T_2 .
- Entre 2 et 3, à pression constante, la vapeur se refroidit jusqu'à la température $T_3= 45^\circ\text{C}$ et se condense entièrement.
- Entre 3 et 4, détente isenthalpique du fluide, qui l'amène à la pression $P_4=3,5$ bar et $T_4=5^\circ\text{C}$.
- En 4, entrée dans l'évaporateur et retour à l'état 1.

Toutes les transformations seront considérées comme réversibles. Les questions 1 et 2 sont indépendantes.

1. On raisonne pour une masse $m=1$ kg de fluide. Écrire l'équation d'état des gaz parfaits en utilisant la constante massique r du fluide ; préciser les unités des grandeurs utilisées.
 - Calculer le volume occupé (en L) par 1 kg de vapeur R12 dans l'état 1.
 - La compression étant isentropique (adiabatique et réversible), quelle relation existe-t-il entre P_1 , V_1 , P_2 et V_2 (relation de Laplace) ? Calculer le volume V_2 occupé par 1 kg de vapeur R12 dans l'état 2.
 - Calculer T_2 .
2. Figure 2 on donne un extrait du diagramme pression-enthalpie (p , h) de l'équilibre " liquide vapeur " du R12. Cet extrait comporte quelques valeurs relatives au système étudié.
 - Placer les états 1, 2, 3, 4 correspondant à ceux du schéma de principe. Remplir les cadres avec les mots : compresseur, détendeur, condenseur et évaporateur.
 - Dans quel élément du circuit, le fluide échange-t-il du travail ? Quel est, du point de vue du fluide, le signe de ce travail ? Quelle en est, pour 1 kg de fluide, la valeur ? Justifier.
 - Dans quel élément du circuit, le fluide rejette-t-il de la chaleur vers le milieu extérieur ? Quelle est, pour 1 kg de fluide, la quantité de chaleur rejetée ? Justifier.

- Entre quels états le fluide reçoit-il de la chaleur ? Quelle est, pour 1 kg de fluide, la quantité de chaleur reçue ? Justifier.
- Définir et calculer le C.O.P. (coefficient de performance aussi appelé efficacité frigorifique) théorique de cette machine de production d'eau glacée.

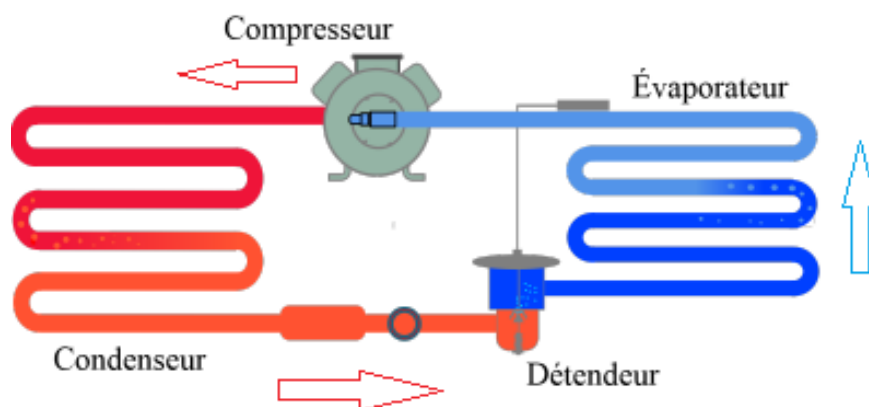


Chapitre III : Composants d'une machine frigorifique à compression de vapeur

III.1 Introduction

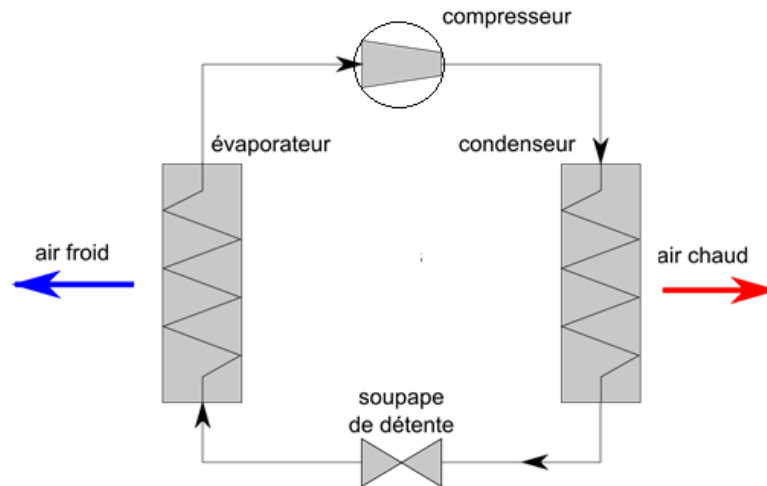
La machine frigorifique à compression de vapeur est composée de 4 organes principaux que sont :

- Le compresseur
- Le condenseur
- Le détendeur
- L'évaporateur



Le fluide frigorigène décrit un cycle fermé en quatre phases à travers le circuit constitué des organes principaux :

- La compression du fluide gazeux
- La condensation du fluide gazeux
- La détente du fluide liquide
- La vaporisation du fluide liquide (production du froid)



Cycle frigorifique

III.2 Le compresseur

Il aspire le fluide frigorigène gazeux (à bas niveau de température et de pression) issu de l'évaporateur, le comprime à un niveau plus haut de température et de pression, puis le refoule vers le condenseur



Compresseur

III.3 Le condenseur

Il est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air.

Cette évacuation de chaleur s'effectue en trois étapes :



- La désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (évacuation par chaleur sensible – tronçon AB)
- La condensation des vapeurs (évacuation par chaleur latente – étape principale – tronçon BC)
- Le sous refroidissement du fluide frigorigène liquide (évacuation par chaleur sensible – tronçon CD)

III.4 Le détendeur

Il permet de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à basse température dans l'évaporateur.

Les détendeurs se regroupent en trois types :

<p>Les tubes capillaires ou détendeurs capillaires</p>	<p>Les détendeurs thermostatiques</p>	<p>Les détendeurs électroniques</p>

III.5 L'évaporateur

Il est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide frigorigène liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux.



Cette absorption de chaleur s'effectue en deux étapes :

L'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur latente – étape principale– tronçon AB)

La surchauffe des vapeurs issues de l'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur sensible – tronçon BC).

Chapitre IV : Autres types de machines frigorifiques

IV.1 Introduction

Les machines frigorifiques à compression sont les plus répandues, mais elles ne sont pas les seules. D'autres types de machines frigorifiques existent, comme les machines frigorifiques à absorption et les cycles à air. Ces machines ont des avantages et des inconvénients qui les rendent plus ou moins adaptées à certaines applications. Les machines frigorifiques à absorption fonctionnent en utilisant la chaleur pour faire passer un fluide frigorigène de l'état liquide à l'état gazeux. Le fluide gazeux est ensuite utilisé pour produire du froid. Les machines frigorifiques à absorption sont généralement plus efficaces que les machines frigorifiques à compression, mais elles nécessitent une source de chaleur externe.

Les cycles à air fonctionnent en utilisant l'air pour produire du froid. L'air est comprimé, puis détendu, ce qui provoque une baisse de sa température. L'air froid est ensuite utilisé pour refroidir un espace. Les cycles à air sont généralement moins efficaces que les machines frigorifiques à compression, mais ils sont moins coûteux et plus faciles à installer.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les machines frigorifiques à absorption et les cycles à air. Nous verrons leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients.

IV.2 Machines frigorifiques à absorption

Les machines frigorifiques à absorption fonctionnent en utilisant la chaleur pour faire passer un fluide frigorigène de l'état liquide à l'état gazeux. Le fluide gazeux est ensuite utilisé pour produire du froid.

IV.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ces machines est basé sur l'absorption d'un fluide frigorigène par un liquide absorbant.

Le cycle frigorifique à absorption se compose de quatre éléments :

Le bouilleur est la partie où le liquide absorbant reçoit de la chaleur d'une source chaude. Cette chaleur provoque l'évaporation du fluide frigorigène, qui s'échappe sous forme de vapeur.

Le condenseur est la partie où la vapeur de fluide frigorigène se condense et cède sa chaleur à l'environnement.

L'évaporateur est la partie où le fluide frigorigène se vaporise et absorbe de la chaleur de l'espace à refroidir.

L'absorbeur est la partie où le fluide frigorigène gazeux est absorbé par le liquide absorbant.

IV.2.2 Cycle frigorifique à absorption

Le bouilleur

- Le liquide absorbant reçoit de la chaleur d'une source chaude.
- Cette chaleur provoque l'évaporation du fluide frigorigène.
- Le fluide frigorigène gazeux s'échappe sous forme de vapeur.

Le condenseur

- La vapeur de fluide frigorigène se condense.
- Elle cède sa chaleur à l'environnement.
- Le fluide frigorigène liquide se forme.

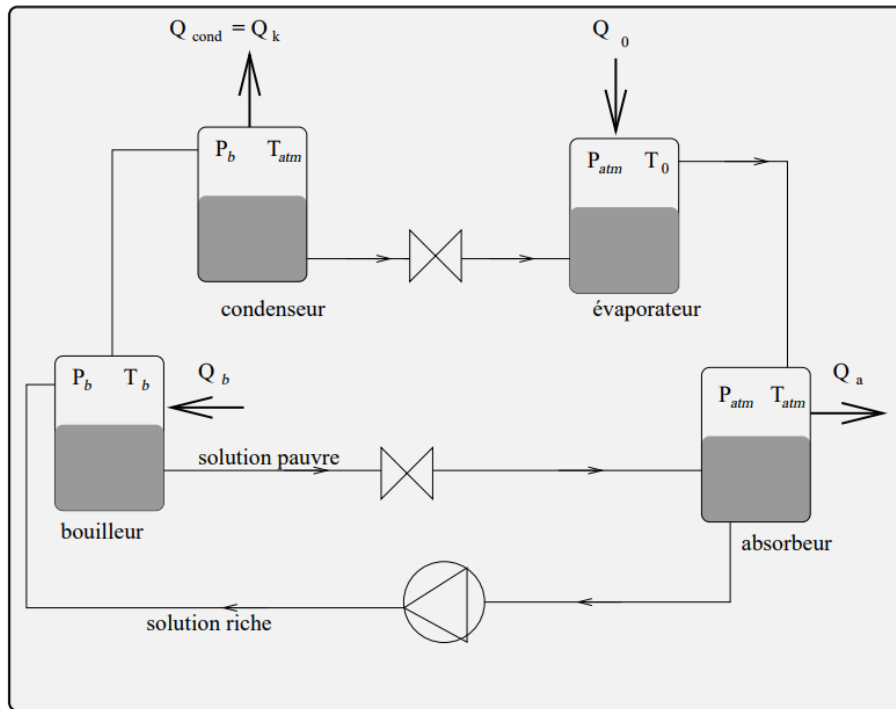
L'évaporateur

- Le fluide frigorigène liquide est détendu.
- Il s'évapore et absorbe de la chaleur de l'espace à refroidir.
- Le fluide frigorigène gazeux se forme.

L'absorbeur

- Le fluide frigorigène gazeux est absorbé par le liquide absorbant.
- Ce processus libère de la chaleur.
- La solution absorbante est enrichie en fluide frigorigène.

La solution absorbante enrichie est pompée vers le bouilleur, où le cycle recommence.



IV.2.3 Avantages et inconvénients

Les machines frigorifiques à absorption présentent les avantages suivants :

- Elles sont généralement plus efficaces que les machines frigorifiques à compression.
- Elles sont plus silencieuses que les machines frigorifiques à compression.
- Elles ne nécessitent pas d'électricité pour fonctionner.
- Les machines frigorifiques à absorption présentent les inconvénients suivants :
- Elles nécessitent une source de chaleur externe.
- Elles sont plus coûteuses que les machines frigorifiques à compression.
- Elles sont plus complexes à installer.

IV.2.4 Applications

Les machines frigorifiques à absorption sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment :

- La production d'eau chaude sanitaire
- Le refroidissement de bâtiments

- La climatisation de véhicules
- La production de glace

Les machines frigorifiques à absorption sont une alternative intéressante aux machines frigorifiques à compression. Elles sont plus efficaces, plus silencieuses et ne nécessitent pas d'électricité pour fonctionner. Cependant, elles nécessitent une source de chaleur externe et sont plus coûteuses et complexes à installer.

IV.2.5 Coefficient de performance

Le coefficient de performance (COP) d'une machine frigorifique à absorption est le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par l'espace à refroidir et le travail fourni par la pompe. Le COP peut être calculé comme suit :

$$COP = \frac{Q_f}{W}$$

Le COP d'une machine frigorifique à absorption est généralement plus élevé que celui d'une machine frigorifique à compression. Cela est dû au fait que la machine à absorption utilise une source de chaleur externe pour faire fonctionner le cycle frigorifique.

Le COP d'une machine frigorifique à absorption est également affecté par les paramètres suivants :

- La température de l'espace à refroidir
- La température de la source chaude
- Les propriétés du fluide frigorigène et du liquide absorbant
- La conception de la machine

Le COP d'une machine frigorifique à absorption peut être amélioré en optimisant ces paramètres.

IV.3 Cycle frigorifique à air

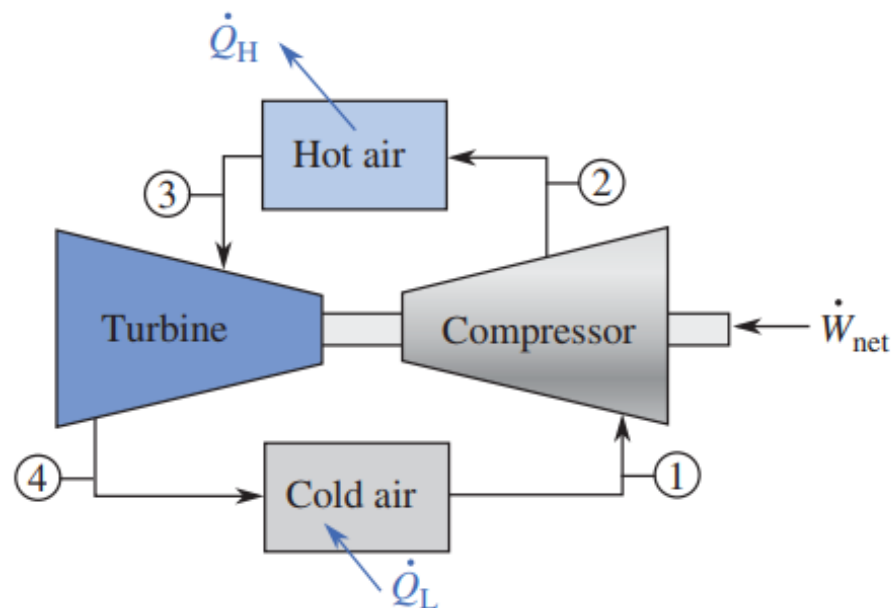
Le cycle de Joule/Brayton inversé est une machine frigorifique qui fonctionne en sens inverse du cycle de Joule/Brayton. Le cycle de Joule/Brayton est un cycle moteur qui utilise

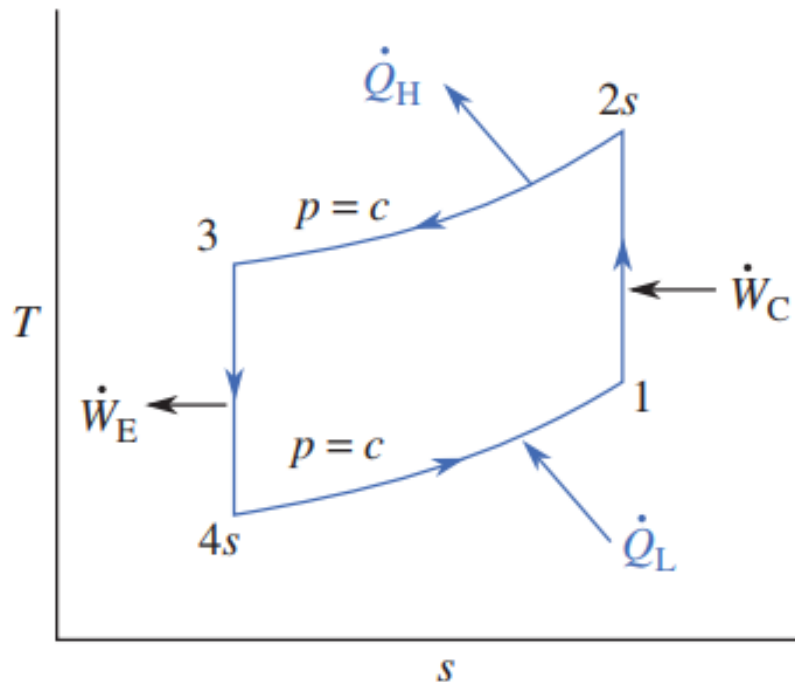
la chaleur pour produire de l'énergie mécanique. Le cycle de Joule/Brayton inversé utilise la chaleur pour produire du froid.

IV.3.1 Principe de fonctionnement

Le cycle de Joule/Brayton inversé est composé des quatre éléments suivants :

- **Le compresseur** est la partie de la machine qui comprime le fluide frigorigène. Ce processus augmente la pression et la température du fluide frigorigène.
- **Le condenseur** est la partie de la machine où le fluide frigorigène cède sa chaleur à l'environnement. Ce processus réduit la température du fluide frigorigène.
- **Le détendeur** est la partie de la machine où la pression du fluide frigorigène est réduite. Ce processus réduit la température du fluide frigorigène.
- **L'évaporateur** est la partie de la machine où le fluide frigorigène absorbe la chaleur de l'espace à refroidir. Ce processus augmente la température du fluide frigorigène.





Le cycle de Joule/Brayton inversé fonctionne comme suit :

- Le fluide frigorigène liquide est comprimé dans le compresseur. Ce processus augmente la pression et la température du fluide frigorigène.
- Le fluide frigorigène gazeux chaud est refroidi dans le condenseur. Ce processus réduit la température du fluide frigorigène.
- Le fluide frigorigène gazeux froid est détendu dans le détendeur. Ce processus réduit la pression du fluide frigorigène.
- Le fluide frigorigène liquide est refroidi dans l'évaporateur. Ce processus absorbe la chaleur de l'espace à refroidir.

IV.3.2 Coefficient de performance

Le coefficient de performance (COP) du cycle de Joule/Brayton inversé est le rapport entre la puissance frigorifique et le travail fourni par le compresseur. Le COP du cycle de Joule/Brayton inversé est généralement inférieur à celui du cycle de Joule/Brayton, car le compresseur doit fournir plus de travail pour comprimer le fluide frigorigène.

Le COP du cycle de Joule/Brayton inversé peut être calculé comme suit :

$$COP = \frac{Q_L}{W_{net}} = \frac{Q_L}{W_{comp} - W_{turb}}$$

- Q_L est la puissance frigorifique (en W)
- W_{comp} est le travail fourni par le compresseur (en W)
- W_{turb} est le travail dissipé par la turbine (en W)

Le COP du cycle de Joule/Brayton inversé est également affecté par les paramètres suivants :

- La température de l'espace à refroidir
- La température de l'environnement
- Les propriétés du fluide frigorigène
- La conception de la machine

Le COP du cycle de Joule/Brayton inversé peut être amélioré en optimisant ces paramètres.

Dans le texte que vous avez fourni, vous expliquez que le cycle de Joule/Brayton inversé est une machine frigorifique qui peut être utilisée pour refroidir un espace à une température inférieure à la température ambiante. Vous expliquez également que le COP du cycle de Joule/Brayton inversé est inférieur à celui du cycle de Joule/Brayton, car le compresseur doit fournir plus de travail pour comprimer le fluide frigorigène.

Vous terminez en disant que le COP du cycle de Joule/Brayton inversé peut être amélioré en optimisant les paramètres suivants :

- La température de l'espace à refroidir
- La température de l'environnement
- Les propriétés du fluide frigorigène
- La conception de la machine

Exercices

Exercice IV-1

Les machines frigorifiques à absorption liquide sont des machines trithermes qui permettent - en utilisant trois niveaux de températures - de produire du froid à partir de chaleur uniquement. Elles fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides d'absorber et de désorber une vapeur. Cette dernière réaction est endothermique et nécessite l'apport de chaleur. Ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatile que l'autre, et constitue le fluide frigorigène, l'autre constitue l'absorbant. Deux couples sont principalement utilisés : Eau+Bromure de Lithium ($H_2O/LiBr$), l'eau étant le fluide frigorigène; Ammoniac+Eau (NH_3/H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène.

On étudie ici les conditions de fonctionnement d'une telle machine frigorifique fonctionnant entre une source chaude à température T_c , une source froide à température T_f , sans apport de travail et avec une source thermique auxiliaire à la température T_a .

Appliquer le premier et le deuxième principe de la thermodynamique au système sur un cycle supposé réversible. Donner la condition sur les trois températures T_c , T_f , et T_a pour qu'une production de froid soit possible.

Donner l'expression de l'efficacité de cette machine. Analyser cette expression et montrer qu'elle peut s'écrire comme le produit de deux efficacités que l'on peut identifier. Faire l'application numérique.

Données :

Pour l'application numérique, on suppose que le mélange utilisé est le mélange Ammoniac+Eau (NH_3/H_2O), et que $T_f = -33^\circ C$, $T_c = +25^\circ C$, et $T_a = 120^\circ C$.

Chapitre V : Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur

V.1 Introduction

Le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur est un processus essentiel dans la conversion de chaleur d'une source froide vers une source chaude, en utilisant un apport d'énergie extérieure. Ce concept repose sur des principes similaires à ceux d'une machine frigorifique, mais avec une orientation différente. Alors que la machine frigorifique vise à transférer la chaleur d'une zone plus froide vers une zone plus chaude, la pompe à chaleur vise à réaliser l'inverse : extraire la chaleur d'une source froide pour la transférer vers une source chaude, généralement dans le but de chauffer un espace ou de produire de l'eau chaude sanitaire.

Tout comme une machine frigorifique, le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur repose sur les principes fondamentaux de la thermodynamique, notamment les lois de la conservation de l'énergie et de l'entropie. Le cycle se compose généralement de quatre étapes principales : compression, condensation, détente et évaporation. Ces étapes sont orchestrées par le fluide frigorigène, qui passe par différents états de pression et de température pour réaliser le transfert de chaleur souhaité.

V.2 Pompes à chaleur : quelles sources d'énergie ?

Les pompes à chaleur sont conçues pour récupérer de l'énergie thermique de différentes sources extérieures, ce qui leur permet de chauffer ou de refroidir des espaces intérieurs de manière efficace. Les trois principales sources d'énergie extérieure à partir desquelles une pompe à chaleur peut fonctionner sont :

1. Air Ambiant : Les pompes à chaleur air-air et air-eau exploitent la chaleur présente dans l'air extérieur pour chauffer ou refroidir un bâtiment. Même par temps froid, il y a toujours une certaine quantité de chaleur disponible dans l'air, que la pompe à chaleur peut extraire et transférer à l'intérieur du bâtiment.

2. Eaux Souterraines ou de Surface : Les pompes à chaleur géothermiques ou aquathermiques récupèrent la chaleur de l'eau souterraine ou de surface, comme les lacs, les rivières ou les puits, pour chauffer ou refroidir. L'eau a une capacité thermique plus élevée que l'air, ce qui en fait une source d'énergie stable et efficace.

3. Sol : Les pompes à chaleur géothermiques utilisent également la chaleur du sol. À quelques mètres de profondeur, la température du sol reste relativement constante tout au long de l'année. La pompe à chaleur capte cette chaleur géothermique en utilisant des boucles de captage enfouies dans le sol, soit horizontalement, soit verticalement.

L'avantage de ces sources d'énergie est qu'elles sont renouvelables et abondantes. Cependant, la performance d'une pompe à chaleur peut varier en fonction de la température extérieure et de la capacité de la source d'énergie à maintenir une température stable. Par exemple, les pompes à chaleur air-air peuvent perdre en efficacité lorsqu'il fait très froid à l'extérieur, tandis que les pompes à chaleur géothermiques sont généralement plus stables en termes de performance.

En fin de compte, le choix de la source d'énergie dépendra des conditions climatiques locales, de la géographie du site et des besoins de chauffage ou de refroidissement de l'espace. Les pompes à chaleur offrent une alternative économe en énergie aux systèmes traditionnels de chauffage et de refroidissement, contribuant ainsi à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

V.3 Types des pompes à chaleur

Les pompes à chaleur (PAC) sont des appareils qui transfèrent de la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Elles peuvent être utilisées pour chauffer un bâtiment, chauffer l'eau sanitaire ou produire de la glace.

Il existe différents types de pompes à chaleur, qui diffèrent par la source de chaleur qu'elles utilisent. Les principaux types de pompes à chaleur sont les suivants :

- **Les pompes à chaleur air-air** : elles utilisent l'air extérieur comme source de chaleur et rejettent la chaleur à l'extérieur. Elles sont les plus courantes, car elles sont relativement peu coûteuses à installer et à entretenir.
- **Les pompes à chaleur air-eau** : elles utilisent l'air extérieur comme source de chaleur et rejettent la chaleur à l'eau d'un puits ou d'une nappe phréatique. Elles sont plus efficaces que les pompes à chaleur air-air, mais elles sont également plus coûteuses à installer.
- **Les pompes à chaleur eau-eau** : elles utilisent l'eau d'un puits ou d'une nappe phréatique comme source de chaleur et rejettent la chaleur à l'eau d'un étang ou d'une rivière. Elles sont les plus efficaces, mais elles sont également les plus coûteuses à installer.
- **Les pompes à chaleur géothermiques** : elles utilisent la chaleur du sol comme source de chaleur. Elles sont les plus efficaces de tous les types de pompes à chaleur, mais elles sont également les plus coûteuses à installer.

Voici un tableau récapitulatif des différents types de pompes à chaleur :

Type de pompe à chaleur	Source de chaleur	Rejet de chaleur	Efficacité	Coût d'installation
Air-air	Air extérieur	Air extérieur	Moyenne	Faible
Air-eau	Air extérieur	Eau	Elevée	Moyen
Eau-eau	Eau	Eau	Très élevée	Élevé
Géothermique	Sol	Sol	Très élevée	Très élevé

Le choix du type de pompe à chaleur approprié dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La température extérieure moyenne de la région
- Le coût de l'énergie
- Le type d'installation
- Les besoins de chauffage et de refroidissement

V.4 Le coefficient de performance

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est un indicateur de l'efficacité de la pompe à chaleur. Il est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur fournie par la pompe à chaleur et l'énergie électrique consommée par la pompe à chaleur.

Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est efficace. Un COP de 3, par exemple, signifie que la pompe à chaleur fournit 3 kilowattheures (kWh) de chaleur pour chaque kilowattheure (kWh) d'énergie électrique consommée.

Le COP d'une pompe à chaleur est déterminé par plusieurs facteurs, notamment :

- La différence de température entre la source chaude et la source froide
- Les propriétés du fluide frigorigène
- La conception de la pompe à chaleur

La température extérieure est le facteur le plus important qui influence le COP d'une pompe à chaleur. En effet, plus la température extérieure est basse, plus il est difficile pour la pompe à chaleur de transférer la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

Les pompes à chaleur air-air ont généralement un COP plus faible que les pompes à chaleur géothermiques. En effet, les pompes à chaleur air-air utilisent l'air extérieur comme source de chaleur, qui est une source de chaleur moins stable que le sol.

Le choix du fluide frigorigène influence également le COP d'une pompe à chaleur. En effet, certains fluides frigorigènes sont plus efficaces que d'autres.

La conception de la pompe à chaleur peut également influencer le COP. En effet, une conception plus efficace permet à la pompe à chaleur de transférer la chaleur plus efficacement.

Le COP d'une pompe à chaleur est une information importante à prendre en compte lors du choix d'une pompe à chaleur. En effet, un COP élevé permet de réduire les coûts de chauffage et de refroidissement.

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est généralement calculé comme suit :

$$COP_c = \frac{\text{chaleur dégagée au puits chaud}}{\text{énergie apportée au système}} = \left| \frac{q_{ch}}{w_{comp}} \right|$$

- q_c est la quantité de chaleur fournie par la pompe à chaleur (en J/kg)
- w_{comp} est l'énergie consommée par le compresseur (en J/kg)

Les coefficients de performance calorifique de ces systèmes idéaux deviennent :

$$COP_c = \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_f}$$

Exercices

Exercice V-1

Une pompe à chaleur Carnot fonctionne dans une habitation où la température est de 22°C et consomme 7 kW de puissance en fonctionnement. Si la température du milieu extérieur est à 7°C , déterminer la quantité de chaleur à injecter dans l'habitation, en une minute.

Exercice V-2

On veut maintenir la température d'une maison à $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ alors que la température extérieure est égale à $T_2 = 5^{\circ}\text{C}$ en utilisant une pompe à chaleur. L'isolation thermique de la maison est telle qu'il faut lui fournir un transfert thermique égal à 200 kJ par heure.

1. Rappeler le schéma de principe d'une pompe à chaleur ditherme et le sens réel des échanges d'énergie du fluide caloporteur.
2. Quel doit être le cycle thermodynamique suivi par le fluide pour que l'efficacité de la pompe à chaleur soit maximale ?
3. Définir et calculer l'efficacité théorique maximale de la pompe dans ces conditions. Montrer qu'elle ne dépend que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Quel est le sens physique de l'efficacité ?
4. En déduire la puissance électrique minimale consommée par la pompe à chaleur.
5. En supposant la température intérieure imposée, pour quelle température extérieure l'efficacité est-elle maximale ? Commenter.

Exercice V-3

Une pompe à chaleur réversible échange de la chaleur avec 2 sources, l'eau d'un lac ($T_f = 280\text{K}$), et une réserve d'eau de masse $M=1000\text{ kg}$ isolée thermiquement ; la température initiale de cette dernière est $T_0 = 280\text{K}$. $c_{eau} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{K.kg}}$. Lorsque la masse d'eau M atteint la température de $T=333\text{ K}$, calculer

- La quantité de chaleur reçue par la réserve d'eau
- Le COP idéal de la pompe à chaleur et le travail fourni par la pompe.

Références Bibliographique

- [1] F. Meunier, Aide-mémoire de Thermodynamique de l'ingénieur. Dunod, 2004.
- [2] F. Meunier and D. Mugnier, La climatisation solaire : Thermique ou photovoltaïque. Dunod, 2013.
- [3] F. Meunier, P. Rivet, and M.-F. Terrier, Froid industriel-2ème édition. Dunod, 2010.
- [4] Lemale Jean, Les pompes à chaleur. Paris : Dunod Editions Le Moniteur, 2012.
- [5] Pohlmann Walther et al., Manuel technique du froid bases, composants, calculs Montage, conduite, maintenance des installations frigorifiques. 1, 2e éd. Ivry-sur-Seine : PYC Ed JMG, 1993.
- [6] J. Desmons, Aide-mémoire de génie climatique-3ème édition. Dunod, 2012.
- [7] H. Recknagel, E. Sprenger, and E.-R. Schramek, Génie climatique-5e éd. Dunod, 2013.
- [8] J. Bonjour, Systèmes frigorifiques, pompes à chaleur et machines à cycle inverse : Principes, état de l'art et tendances. ISTE Editions Limited, 2023. [Online] Available: <https://books.google.dz/books?id=NeHLEAAAQBAJ>
- [9] D. Bieler and H. P. Wittwer, Machines frigorifiques et pompes à chaleur. EICN, 1975. [Online]. Available: <https://books.google.dz/books?id=PczOzQEACAAJ>
- [10] G. Vrinat, "Production du froid: technologie des machines industrielles," Froid industriel, Aug. 1991, doi: 10.51257/a-v1-b2365.
- [11] R. T. Balmer, "Vapor and Gas Refrigeration Cycles," in Modern Engineering Thermodynamics, Elsevier, 2011, pp. 535–590. doi: 10.1016/B978-0-12-374996-3.00014-2.

Résumé

Ce manuscrit de cours, destiné aux étudiants de troisième licence énergétique, présente une étude approfondie des machines frigorifiques et des pompes à chaleur. Il explore les principes fondamentaux de ces systèmes thermodynamiques complexes, en examinant leurs cycles, leurs composants clés et leurs applications variées. Les machines frigorifiques et les pompes à chaleur jouent un rôle fondamental dans notre quête continue d'efficacité énergétique et de confort thermique. Elles nous permettent de maintenir des températures optimales, que ce soit pour conserver nos aliments, maintenir des conditions de travail confortables ou encore participer à la transition vers des sources d'énergie renouvelables. Ce manuscrit est conçu pour fournir aux étudiants une base solide dans la compréhension de ces technologies essentielles. Il aborde les aspects théoriques et pratiques des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, ainsi que les considérations techniques, environnementales et les innovations récentes qui redéfinissent le paysage de ces technologies.

Mots-clés : Machines frigorifiques ; pompes à chaleur ; Thermodynamique ; Efficacité

Abstract

This course manuscript, dedicated to third-year energy students, presents an in-depth study of refrigeration and heat pumps. It explores the fundamental principles of these complex thermodynamic systems, examining their cycles, key components, and diverse applications. Refrigeration and heat pumps play a fundamental role in our ongoing quest for energy efficiency and thermal comfort. They allow us to maintain optimal temperatures, whether for preserving food, maintaining comfortable working conditions, or participating in the transition to renewable energy sources. This manuscript is designed to provide students with a solid foundation in understanding these essential technologies. It addresses the theoretical and practical aspects of refrigeration and heat pumps, as well as the technical, environmental considerations, and recent innovations that are redefining the landscape of these technologies.

Keywords: Refrigeration; Heat pumps; Thermodynamics; Energy efficiency