

Chapitre 5

Machines frigorifiques

Objectifs

A la fin du chapitre, l'étudiant doit être capable de

- Connaitre la machine frigorifique et ses principaux éléments
- Distinguer entre les différents fluides frigorigènes

I. Généralités

Les machines frigorifiques servent à la création de froid à l'aide d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur.

Elle se compose au minimum des 4 éléments suivants :

- 1 évaporateur : placé dans le milieu à refroidir pour assurer la production frigorifique.
- 1 condenseur placé dans le milieu auquel on désire céder une quantité de chaleur.
- 1 compresseur permettant d'assurer un mouvement continu du fluide frigorigène et de le faire comprimer de la basse pression à la haute pression.
- 1 organe de détente (Vanne d'expansion) dont le rôle est de régler le débit du réfrigérant circulant dans l'installation frigorifique et assurer la détente du réfrigérant de la pression d'évaporation (Basse pression P) à la pression de condensation (Haute Pression).

La machine frigorifique est basée sur la propriété des fluides frigorigènes de s'évaporer et de se condenser à des températures différentes en fonction de la pression.

II. Principe de fonctionnement

Pour expliquer le fonctionnement, nous prendrons comme exemple les caractéristiques du fluide frigorigène R22.

Dans l'évaporateur

Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe (entre 7 et 1) (figure 5.1).

La surchauffe d'une vapeur représente la différence entre la température de cette vapeur et la température d'évaporation du liquide qui lui a donné naissance

Pour cette installation, la surchauffe notée S est donnée par :

$$S = T_{vap} - T_{evap}$$

Avec

S : Surchauffe de vapeur exprimée en °C.

T_{vap} : Température de vapeur en °C.

T_{evap} : Température d'évaporation du liquide

$$S = T_1 - T_7$$

On rencontre généralement sur les évaporateurs à détente directe une valeur de la surchauffe comprise entre 5 et 8°C

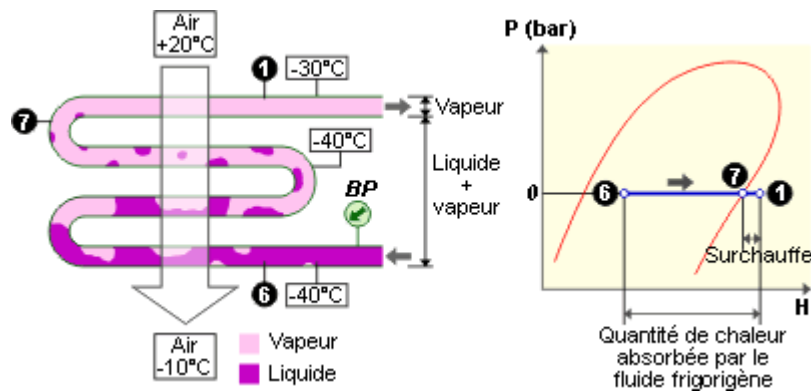


Figure 25: Fonctionnement de l'évaporateur

Dans le compresseur

Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température (1). L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera (figure 5.2).

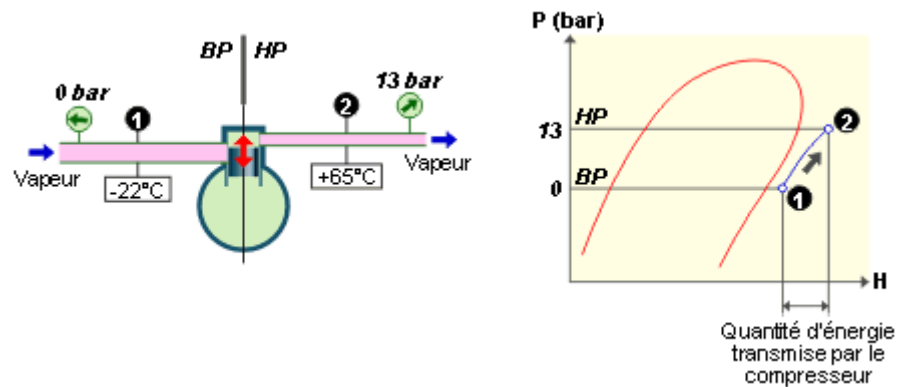


Figure 26: Fonctionnement du compresseur

Dans le condenseur

Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe"), avant l'apparition de la première goutte de liquide (point 3), puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (point 4). Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur (figure 5.3).

L'un des renseignements les plus importantes sur la durée de vie de circuit frigorigère est la valeur du sous refroidissement du liquide à la sortie du condenseur.

Le sous refroidissement d'un liquide représente la différence entre la température de condensation et la température du liquide à la sortie du condenseur.

$$R = T_c - T_s$$

Avec

R : Sous refroidissement du liquide exprimé en °C.

T_C : Température de condensation en °C.

T_s : Temperature du liquide à la sortie de condenseur.

$$R = T_C - T_s = T_4 - T_5$$

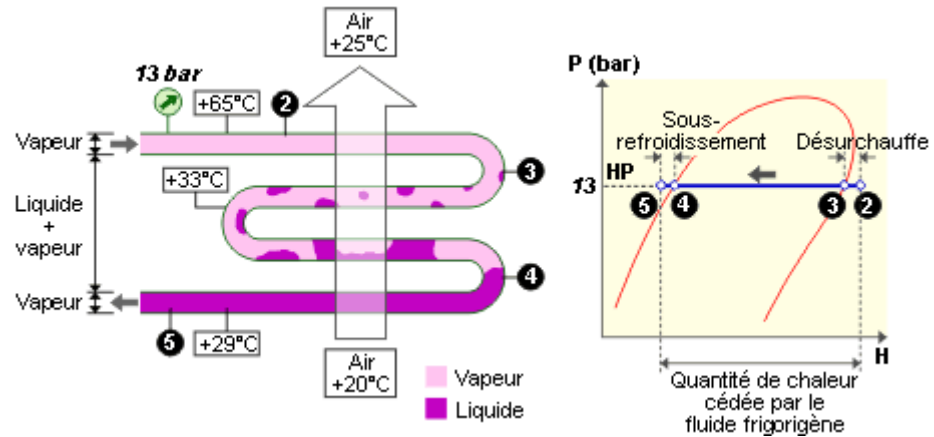


Figure 27:Fonctionnement du condenseur

Dans le détendeur

La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif "abaisseur de pression" dans le circuit. C'est le rôle du détendeur. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température (figure 5.4).

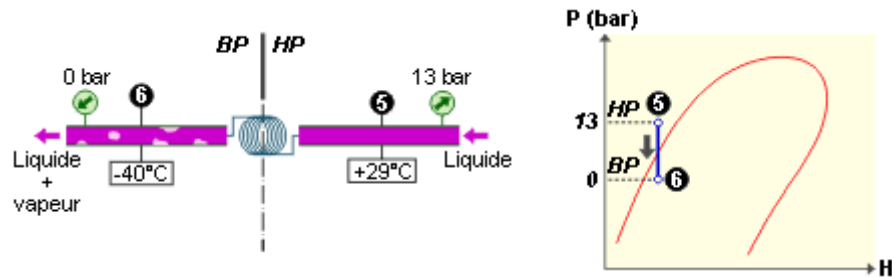


Figure 28:fonctionnement du détendeur

On note qu'au cours de la détente, on n'a pas un travail fourni ou consommé et il n'y a pas un transfert de chaleur avec le milieu extérieur. Donc, l'enthalpie est la même à l'entrée et à la sortie du détendeur .La transformation 5-6 est isenthalpique. Elle est représentée par une droite parallèle à l'axe des ordonnées

Fonctionnement complet

Le cycle est fermé, le fluide frigorigène évolue sous l'action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique (figure 5.5).

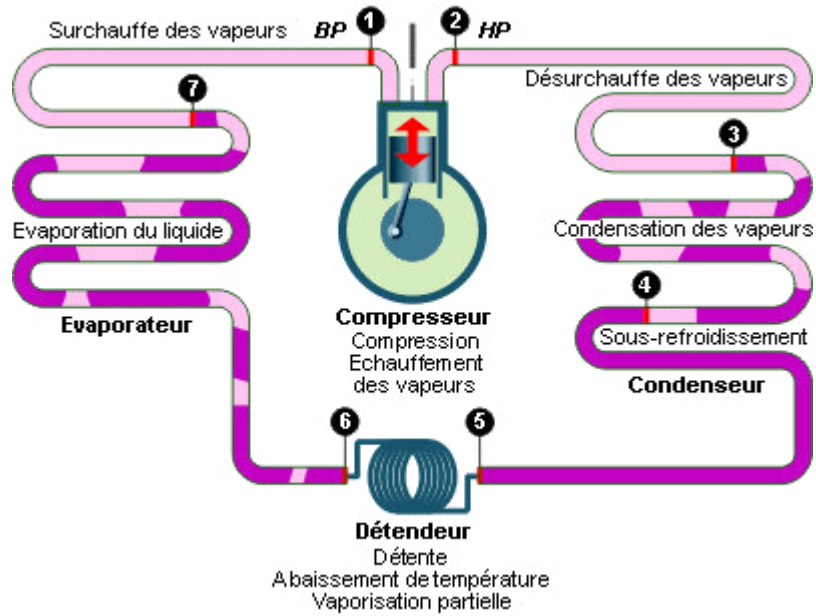


Figure 29:Cycle frigorifique

L'ensemble du cycle peut être représenté dans le diagramme enthalpie-pression (figure 5.6).

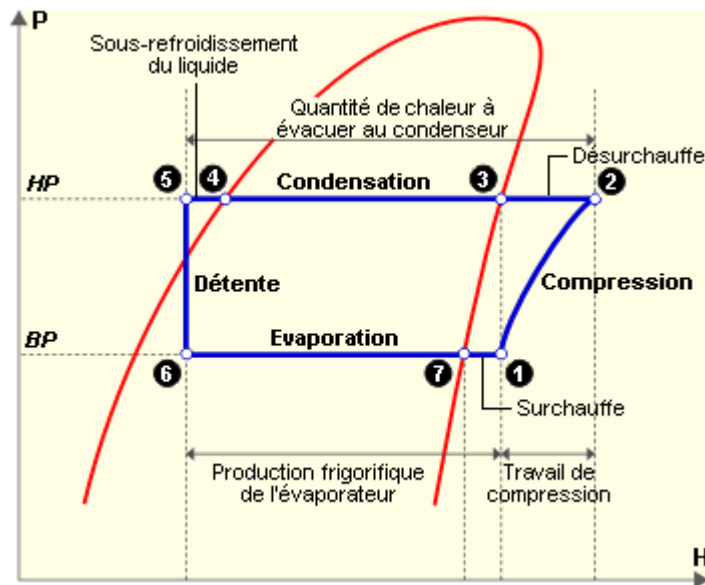


Figure 30:Diagramme enthalpique du cycle frigorifique

Coefficient de performance

C'est le rapport entre la production frigorifique et le travail effectué pour obtenir cette production frigorifique.

La production frigorifique : c'est la quantité de chaleur (exprimée en J) absorbée par seconde par le fluide caloporteur dans l'évaporateur (ou extraite du milieu à refroidir).

II. Fluides frigorigènes

Dans toute machine frigorifique évolue un fluide frigorigène. C'est un composé chimique facilement liquéfiable, dont on utilise la chaleur latente de vaporisation pour produire du froid.

Le premier fluide frigorigène utilisé fut l'eau dans un montage de laboratoire en 1755, puis l'éther sulfurique en 1834 puis l'air en 1844, et puis à partir de 1930 une nouvelle gamme de fluides frigorigènes fut mise au point aux Etats Unis d'Amérique, ce sont les chlorofluorocarbones bien connus sous le sigle CFC. Ces derniers révolutionnèrent le marché frigorifique.

1. Propriétés

Pour qu'une substance joue le rôle d'un fluide frigorigène il faut qu'elle ait:

- Une chaleur latente élevée
- Une capacité calorifique C_p élevée
- Un titre en vapeur après la détente le plus faible possible
- Une stabilité aux différentes températures du cycle
- Non inflammable et non explosive
- Non corrosive vis-à-vis du matériel avec lequel elle est en contact
- Ne réagit pas avec les composants de l'air atmosphérique
- Le rapport de compression est faible

2. Domaine d'application

Le tableau suivant résume les domaines d'application privilégiés des fluides frigorigènes les plus utilisés

Machines thermiques

Fluide frigorigène n°	Désignation chimique	Formule chimique	Plage d'utilisation	Domaines d'application
R12	Dichlorodifluorométhane	CCl ₂ F ₂	-40 à +10	Réfrigérateurs, installations frigorifiques industrielles, équipements frigorifiques des engins de transport...
			±0 à 40	Pompes à chaleur
R12B1			±0 à +50	Installations de conditionnement d'air industrielles dont la température d'air recyclé est élevée
R13	Monochlorotrifluorométhane	CClF ₃	-100 à -60	Installations frigorifiques en cascade pour applications industrielles
R13B1	Trifluorométhane	CBrF ₃	-80 à -40	Installations frigorifiques mono et bi étagée pour applications industrielles et laboratoires
R21	Dichlorofluorométhane	CHCl ₂ F	-20 à +20	Pompes à chaleur, installations frigorifiques à température de condensation élevée
R22	Monochlorodifluorométhane	CHClF ₂	-50 à +10	Appareils de conditionnement d'air, installations frigorifiques pour navires, installations de congélation
R23	Trifluorométhane	CHF ₃	-100 à -60	Installations frigorifiques en cascade pour applications industrielles et laboratoires
R114	1,2-dichlorotétrafluorométhane	CClF ₂ -CClF ₂	+50 à +80	Pompes à chaleur
R500	Mélange de R12 et de R152 ^a	CCl ₂ F ₂ /CH ₃ -CHF ₂	-40 à +10	Appareils ménagers, installations industrielles
			-40 à +30	Pompes à chaleur
R502	Mélange de R22 et de R115	CHClF ₂ /CClF ₂ -CF ₃	-60 à -20	Fluides frigorigènes pour compression mono étagée dans installations frigorifiques à refroidissement à air pour congélateurs et installations frigorifiques pour supermarchés et l'industrie.
R717	Ammoniac	NH ₃	-70 à +10	installations frigorifiques pour produits animaux, applications industrielles
R22	Monochlorodifluorométhane	CHClF ₂	-70 à -20	Installations de congélation, installations frigorifiques pour applications industrielles
R717	Ammoniac	NH ₃	-70 à -20	

3. Nomenclature

Un fluide frigorigène est désigné par la lettre R suivie par un code: exemple R12, R13, R717...

Il existe trois types de fluide frigorigène:

- Les CFC: chlorofluorocarbone

Il détériore la couche d'ozone, il est donc interdit depuis l'an 2000. Exemple : R12, R11, R13...

- Les HCFC: hydrochlorofluorocarbone

Afin d'assurer la continuité de service des installations existantes, les producteurs de fluide frigorigène ont élaboré des fluides dits: "fluide de transition". Ce sont les HCFC, qui ont une faible action sur la couche d'ozone. Ils sont interdits à partir de 2015. Exemple R22, R123....

- Les HFC: hydrofluorocarbone

Ce sont les fluides frigorigènes définitifs, qui n'ont aucune action sur la couche d'ozone. Exemple : R134a, R32...

4. Codification

La codification Rxyz signifie :

x: nombre d'atomes de carbone -1

y: nombre d'atomes d'hydrogène +1

z: nombre d'atomes de fluore

a: molécule asymétrique

b: molécule symétrique

Exemple1

R134a: C=2, H=2, F=4, molécule asymétrique

R22: C=1, H=1, F=2

On trouve aussi l'ammoniac utilisé comme fluide frigorigène codé R717.

Exemple2

Le fluide frigorigène **R22** (CHCIF₂)

R022

2 : Nombre d'atomes de fluor

2 : Nombre d'atomes d'hydrogène + 1

0 : Nombre d'atomes de carbone – 1

Nombre d'atomes de chlore= 4 moins 1 atome d'hydrogène et moins 2 atomes de fluor=1

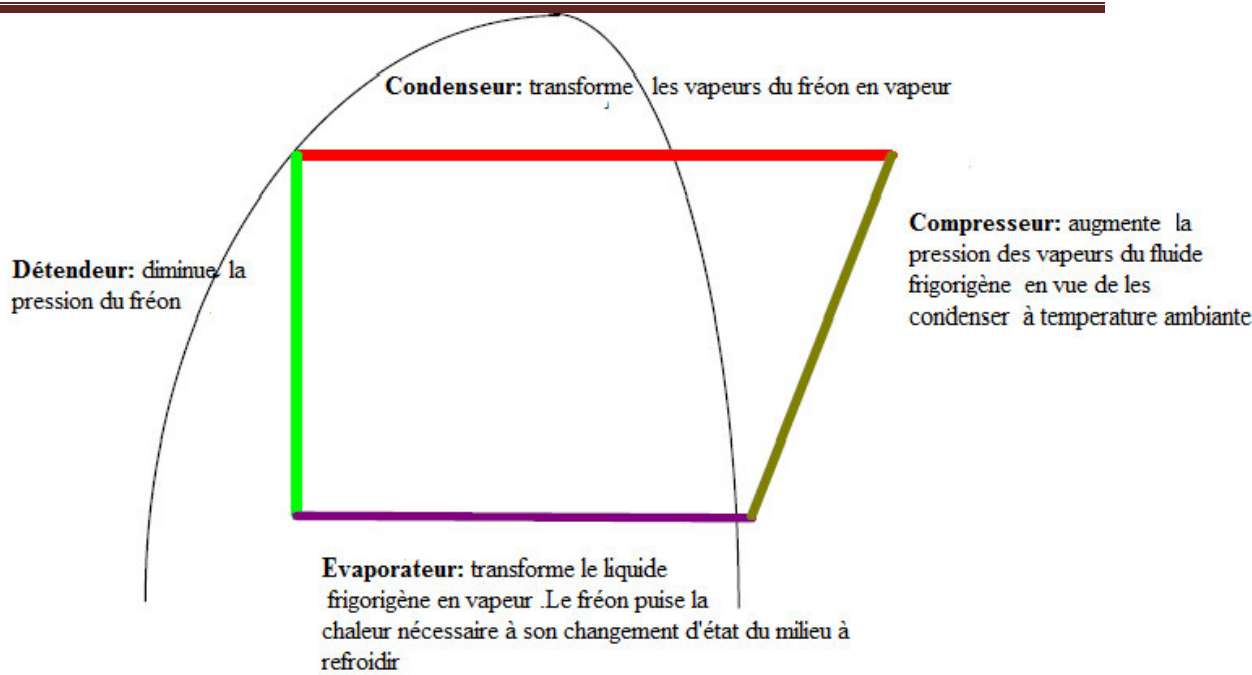
Exercices d'application

Exercice 1

- 1) Expliquer pourquoi les machines frigorifiques de production de froid sont appelées des machines frigorifiques de même pourquoi les fluides caloporteurs utilisés par ces machines sont appelés fluides frigorigènes
- 2) Quelle est la caractéristique thermodynamique principale d'un fluide frigorigène
- 3) Schématiser dans le diagramme enthalpique le cycle de fonctionnement des machines frigorifiques tout en indiquant sur le diagramme les principaux composants de ces machines et le rôle de chacun de ces composants

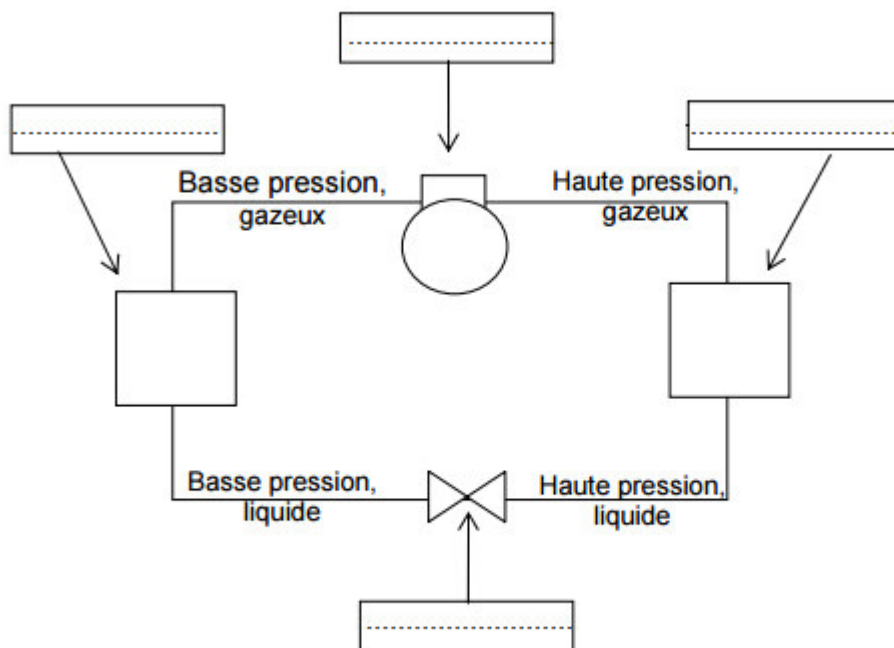
Réponse

1. Les machines de production de froid sont appelées machines frigorifiques car ils sont capable d'extraire de la chaleur d'un milieu à refroidir, ce phénomène se traduit d'un abaissement de la température de ce milieu.
2. Les fluides caloporteurs utilisés sont appelées fluides frigorigènes car ils produisent des frigories (avec $1 \text{ fri} = -1 \text{ Kcal}$)
3. La caractéristique principale d'un fluide frigorigène est la température d'ébullition (environ -40°C à pression atmosphérique).
- 4.



Exercice2

On considère une unité frigorifique à compression mécanique de vapeur utilisée pour refroidir un jus de fruit après pasteurisation. Le schéma simplifié de principe de fonctionnement de l'installation est représenté sur la figure ci-après.



1. Nommer les éléments du dispositif représenté ci-dessus et expliquer de quoi il s'agit ?
2. Dans quel élément du circuit frigorifique le fluide passe de l'état vapeur à l'état liquide ?
3. Mettre une croix sur la réponse correcte ?
 - A l'entrée du compresseur on a :
 - Vapeur chaude
 - Vapeur sous refroidie
 - Vapeur surchauffée
 - Liquide froid
 - A l'entrée du l'évaporateur on a :
 - Liquide chaude
 - Liquide froid BP
 - Vapeur+ liquide BP
 - Vapeur sous refroidie
- 1- Expliquer pourquoi la détente s'effectue à enthalpie constante.
- 2- On refroidit 6000 L de jus de fruit par heure, de 50 °C à 4°C. La capacité thermique massique du jus de fruits est $c = 4,0.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ et sa masse volumique est de 1085 kg.m^{-3} .
Calculer la masse du jus de fruit refroidie en une heure.

Exercice3

On souhaite produire une puissance frigorifique de 20 Kw.

Données

- Température d'évaporation $T_{\text{évap}} = 0^\circ\text{C}$
 - Température de condensation $T_{\text{cond}} = 40^\circ\text{C}$
1. Schématiser sur le diagramme du R134a, le cycle de référence
 2. Relever les caractéristiques thermodynamiques (pression, température et enthalpie massique), remplir le tableau suivant :

Point	T_{sat}	P	T	H
1				
2				
3				
4				

3. Déterminer le débit massique et volumique du frigorigène

4. Calculer la puissance calorifique
5. Calculer le coefficient de performance COP de l'installation. Le comparer avec le COP de Carnot.

Exercice 4

On considère les deux machines frigorifiques schématisées sur les figures **A** et **B** et fonctionnant au fréon **R134a**. Dans la deuxième machine, un échangeur de chaleur est ajouté afin de surchauffer davantage la vapeur du fluide frigorigène avant sa pénétration dans le compresseur, par le liquide venant du condenseur qui, lui-même, est ainsi refroidi.

Données :

- Température d'évaporation : $T_e = -25^\circ\text{C}$
- Température de condensation $T_c = 40^\circ\text{C}$
- Point 1 : surchauffe totale $S = 10^\circ\text{C}$
- Point 1' : $T_{1'} = 15^\circ\text{C}$
- Compression isentropique
- Point 3 : Sous refroidissement à la sortie du condenseur $R = \quad - \quad = 5^\circ\text{C}$ $P_3 = 12\text{bar}$.

Partie A : Machine frigorifique simple

1. Donner les principales caractéristiques d'un fluide frigorigène.
2. Déterminer la composition chimique du fréon utilisé.
3. Représenter schématiquement le cycle dans le repère (T-S).
4. Déterminer les propriétés thermodynamique du réfrigérant aux points 1,2 et 3 du cycle.
5. Donner le rôle du détendeur puis montrer que la détente est isenthalpique.
6. Déterminer le titre en vapeur x en fin de la détente.
7. Exprimer puis calculer les flux thermiques échangés dans le condenseur et l'évaporateur.
8. Calculer le travail fourni par le compresseur.
9. Déduire le coefficient de performance **COP** de la machine.

Partie B : Machine frigorifique avec échangeur sous-refroidisseur

10. Déterminer les caractéristiques du fluide frigorigène aux différents points de cette installation.
11. Calculer le coefficient de performance de la machine.
12. Comparer les COP de deux installations et commenter.

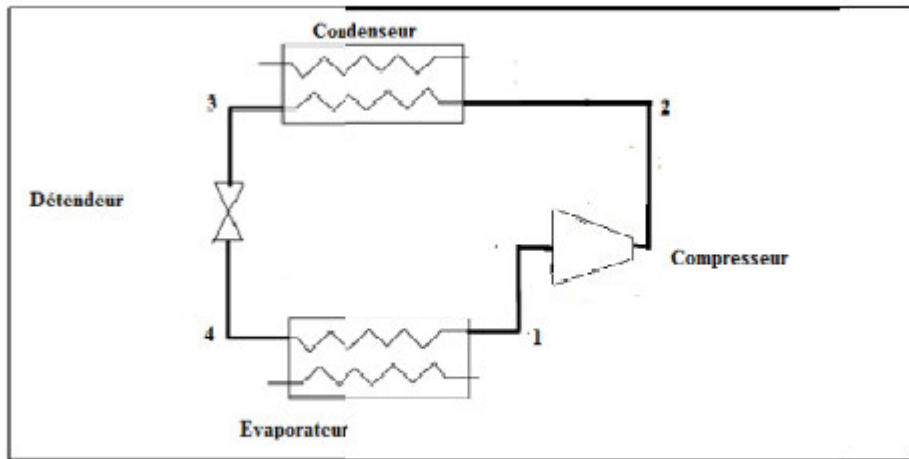


Figure a : Schéma d'une machine frigorifique simple

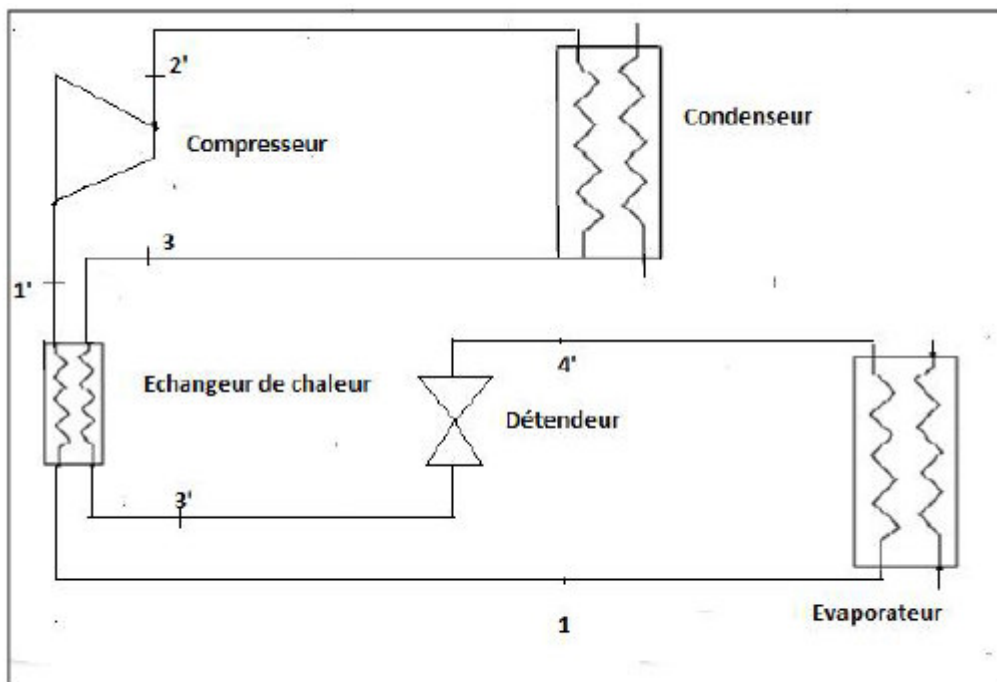


Figure b : Schéma d'une machine frigorifique avec échangeur sous refroidisseur.

Propriétés thermodynamique de R134a : Equilibre liquide-vapeur

	P(bar)	T(°C)	h(kj/kg)	s(kj/kgk)
liquid	1	-26,361	165,44	0,867
vapor	1	-26,361	382,6	1,745
liquid	1,064	-25	167,19	0,874
vapor	1,064	-25	383,45	1,746
liquid	1,5	-17,132	177,36	0,914
vapor	1,5	-17,132	388,32	1,738
liquid	2	-10,076	186,6	0,94
vapor	2	-10,076	392,62	1,733
liquid	2,5	-4,283	194,27	0,979
vapor	2,5	-4,283	396,08	1,729
liquid	3	0,672	200,9	1,003
vapor	3	0,672	399	1,727

Isobare $P_c=12$ bar				Isobare $P_c=1.064$ bar			
	T(°C)	h(kj/kg)	s(kj/kgk)		T(°C)	h(kj/kg)	s(kj/kgk)
	25	234,57	1,118	liquid	-25	167,19	0,874
	30	241,71	1,142	vapor	-25	383,45	1,746
	35	248,98	1,166		-20	387,44	1,762
	40	256,37	1,189		-15	391,44	1,777
	45	263,93	1,213		-10	395,46	1,793
liquid	46,31	265,95	1,22		-5	399,5	1,808
vapor	46,31	422,04	1,708		0	403,57	1,823
	50	426,41	1,722		5	407,68	1,838
	55	432,17	1,74		10	411,81	1,853
	60	437,79	1,757		15	415,98	1,867
	65	443,31	1,773		20	420,19	1,882
	70	448,76	1,789		25	424,43	1,896
	75	454,16	1,805		30	428,71	1,91
	80	459,53	1,802				
	85	464,88	1,835				
	90	470,22	1,85				
	95	475,55	1,864				
	100	480,87	1,879				

Réponse

Tableau A : Résultats de calcul de l'installation A

Point	Pression	Température	Enthalpie massique	Entropie massique	Etat physique
Unités	bar	°C	Kj/Kg	Kj/KgK	
1	1.064	-15	391,44	1,777	Vapeur surchauffée
2	12	66,25	444,67	1,777	Vapeur surchauffée
3	12	35	248,98	1.166	Liquide sous-refroidi
4	1.064	-25	248,98	1,205	Mélange liquide - vapeur

Tableau B : Résultats de calcul de l'installation B

Point	Pression	Température	Enthalpie massique	Entropie massique	Etat physique
Unités	bar	°C	Kj/Kg	Kj/KgK	
1'	1.064	15	415.98	1,867	Vapeur surchauffée
2'	12	96	476,61	1,867	Vapeur surchauffée
3'	12	-	248,98	-	Liquide sous-refroidi
4'	1.064	-25	248,98	1,099	Mélange liquide - vapeur