

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : INSTALLATIONS ÉNERGÉTIQUES ET TURBOMACHINES

PAR :

AIT SAID RASSIM

ADJOU SAMIR

Thème

Etude et dimensionnement d'un groupe frigorifique à eau glacée

SOUMMAM-AKBOU

Soutenu le2018 devant le jury composé de:

Mr.	Président
Mr. DJERRADA Abderrahmane	Rapporteur
Mr.	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

**En premier lieu, on remercie Dieu tout puissant de nous avoir aidés
pour arriver à terme de ce travail.**

On tient à remercier nos familles,

**On tient à remercier vivement notre encadreur Mr DJERRADA.A
pour sa disponibilité et son aide tout au long de ce travail.**

**On tient à remercier tous nos collègues et tous les enseignants du
département génie mécanique.**

**On tient à exprimer nos remerciements à toutes les personnes qui
nous ont aidés dans l'accomplissement de ce projet.**

**Que Monsieur le Président et Messieurs les membres du jury
trouvent ici l'expression de notre gratitude pour avoir accepté
d'examiner et de juger ce modeste travail.**

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ma vie, que Dieu les bénisse. A mes frères qui m'on toujours aidé.

A ma fiancée qui a toujours été là à mes côtés, m'a énormément soutenu et encouragé.

A mes grands parents, tous mes oncles et tantes précisément mon oncle Farouk et sa femme.

A tous mes amis, et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Rassim

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation de la Laiterie SOUMMAM	
I.1. Historique	2
I.2. Situation géographique	3
I.3. Activité	3
I.4. Evolution de l'entreprise	3
I.5. Gamme	3
I.6. Positionnement sur le marché algérien	4
I.7. Réseau de distribution, moyens logistiques et humains	4
I.8. Collecte de lait	4
I.9. Description du groupe frigorifique	5
Chapitre II : Généralité sur le froid	
II.1. La production du froid	6
II.2. Historique	6
II.3. Domaine d'utilisation du froid	6
II.4. Les différents principes de production de froid	7
II.5. Les machines frigorifiques	7
II.5.1. Les machines frigorifiques à fluide liquéfiable	7
II.5.1.1. Les machines frigorifiques à compression mécanique	7
II.5.1.2. Machine a absorption	9
II.5.2. Machine frigorifique a gaz froid	11
II.6. Les différents éléments d'une installation frigorifique	12
II.6.1. Compresseur	12
II.6.2. Détendeur	16
II.6.3. Condenseur	18
II.6.3.1. Condenseur à air	19
II.6.3.2. Condenseur à eau	19
II.6.3.3. Condenseur évaporatifs	20
II.6.4. Les évaporateurs	20

Sommaire

II.6.4.1. Evaporateurs à refroidisseurs d'air.....	20
II.6.4.2. Evaporateurs à refroidisseurs du liquide.....	20
II.7. Les différentes performances frigorifiques.....	21

Chapitre III : Les fluides frigorigènes

III.1. Définition.....	22
III.2. les différents types des fluides frigorigènes.....	22
III.2.1. Les substances inorganiques pures.....	22
III.2.2. Les hydrocarbures.....	23
III.2.3. Les hydrocarbures halogènes.....	23
III.2.4. Autres fluides.....	26
III.3. Nomenclature et les critères de choix.....	27
III.3.1. La nomenclature.....	27
III.3.2. Les critères de choix.....	29
III.4. L'impact des fluides frigorigènes.....	31
III.4.1. L'impact sur l'environnement.....	31
III.4.2. L'impact sur la santé et la sécurité.....	32
III.4.3. L'impact sur le bilan énergétique.....	33
III.5. Propriétés chimiques et physiques d'ammoniac.....	33
III.6. Propriétés chimiques et physiques du R134a.....	35

Chapitre IV : Analyse Thermodynamique

Introduction	36
IV.1. Etude du groupe frigorifique à ammoniac.....	36
IV.1.1. La charge de l'installation.....	36
IV.1.2. Calcul thermodynamique dans le cas le plus défavorable.....	37
IV.2. Calcul des charges de quelques ateliers.....	45
IV.3. Etude du groupe frigorifique à R134a.....	46
IV.4. Comparaison entre l'ammoniac et le R134a.....	54
Conclusion.....	56
Conclusion générale	57

Sommaire

Liste des tableaux

TABLEAU III.1. Quelques fluides de famille CFC.....	23
TABLEAU III.2. Quelques fluides de famille HCFC.....	24
TABLEAU III.3. Quelques fluides de famille HFC.....	24
TABLEAU III.4. Description des principaux fluides frigorigènes	25
TABLEAU III.5. Description d'autres fluides frigorigènes utilisés dans le froid	27
TABLEAU III.6. Groupes des sécurités pour les fluides frigorigènes	30
TABLEAU III.7. Classement de quelques fluides frigorigènes.....	31
TABLEAU III.8. Propriété physiques de l'ammoniac.....	33
TABLEAU IV.1. Coordonnées thermodynamiques de chaque point de cycle du R717...38	
TABLEAU IV.2. Quelques besoins du froid SOUMMAM.....	45
TABLEAU IV.3. Coordonnées thermodynamiques de chaque point de cycle du R134a..46	
TABLEAU IV.4. Paramètre de comparaison entre le R717 et le R134a.....	54

Liste des figures

Figure I.1. Groupe frigorifique à eau glacée.....	5
Figure II.1. Machine à un étage de compression mécanique.....	8
Figure II.2. Machine à absorption.....	10
Figure II.3. Machine à gaz froid.....	11
Figure II.4. Les phases de compresseur à vis.....	13
Figure II.5. Compresseur à vis.....	14
Figure II.6. Compresseur à palette.....	14
Figure II.7. Diagramme indiqué du piston.....	15
Figure II.8. Principe de fonctionnement d'un compresseur à piston.....	15
Figure II.9. Compresseur à piston.....	16
Figure II.10. Détendeur capillaire.....	17
Figure II.11. Détendeur thermostatique.....	17
Figure II.12. Détendeur électrostatique.....	18
Figure II.13. Les trois zones de fonctionnement d'un condenseur.....	19
Figure IV.1. Schéma de l'installation.....	36
Figure IV.2 Variation du rendement volumétrique η_v en fonction du taux de compression	40
Figure IV.3. Tracé du cycle du R717 sur le diagramme (T, S).....	42
Figure IV.4. Tracé du cycle du R717 sur le diagramme (p, h).....	43
Figure.IV.5. Tracé du cycle du R134a sur le diagramme (P, h).....	51
Figure IV.6. Tracé du cycle du R134a sur le diagramme (T, S).....	52

Nomenclature

Nomenclature :

Notation	Désignation	Unités
q_m	Débit massique	[kg/s]
Φ_0	Charge frigorifique	[kW]
h	Enthalpie massique	[kJ/kg]
η_i	Rendement indiqué du compresseur	Sans unité
η_{effe}	Rendement effectif du compresseur	Sans unité
τ	Taux de compression	Sans unité
P_{th}	Puissance théorique	[kW]
Φ_k	Puissance rejetée au condenseur	[kW]
P_{effe}	Puissance effective du compresseur	[kW]
CFC	ChloroFluorocarbone	Sans unité
HCFC	Hydro colorofluorocarbone	Sans unité
HFC	Hydro fluorocarbone	Sans unité
ODP	Ozon déplétion potentiel	Sans unité
GWP	Globale warning potentiel	Sans unité
TEWI	Total equivalent warning impact	Sans unité
L	Emission annuelles de fluide	[kg]
n	Durée de vie de système	[année]
m	Charge du fluide frigorigène	[kg]
l	Facteur de récupération, recyclage entre 0 et 1	Sans unité
E	Consommation annuelle d'énergie	[kWh]
B	Emission de CO ₂	[kg/kWh]
BBP	Bouteille basse pression	Sans unité

Nomenclature

P	Puissance	[kW]
p	Pression	[bar]
T	Température	[°C ; K]
q_v	Débit volumique	[m ³ /s]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
C_{eau}	Chaleur massique	[kJ/kg °C]
S	Entropie	[kJ/kg K]
V	Volume massique	[m ³ /kg]
X	Titre de vapeur	Sans unité
η_v	Rendement volumique	Sans unité
(η_s)_c	Rendement isentropique du compresseur	Sans unité
COP_{effe}	Coefficient de performance effectif	Sans unité
S (r ; a)	Surface à l'admission ou au refoulement	[m ²]
C (r ; a)	Vitesse à l'admission ou au refoulement	[m/s]

INTRODUCTION GENERALE

Qu'est-ce que Produire du froid ?

Produire du froid c'est absorber de la chaleur. Pour refroidir un corps, abaisser sa température, il faut lui extraire de l'énergie calorifique. On conçoit qu'il soit toujours facile de refroidir un corps quelconque jusqu'à la température des moyens naturels de refroidissement dont on dispose, (air ou eau). Mais lorsqu'on veut le porter à une température inférieure à celle de ces moyens naturels, il est nécessaire de mettre en jeu un phénomène permettant une absorption de chaleur, (phénomène endothermique), qui s'effectue à température suffisamment basse, inférieure à celle que doit atteindre le corps.

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variées (industries agro-alimentaires, médecine, confort thermique, pétrochimie...) et c'est dans le domaine alimentaire que le froid occupe une place prépondérante car il permet de limiter les gaspillages (pertes après récolte...) et de prolonger la durée de conservation des produits ce qui permet un élargissement des échanges.

On a pu estimer que dans certaines régions du monde, 50% des denrées alimentaires disponibles se perdent entre la période qui s'écoule entre le moment de la production et celui de la consommation. Ainsi, dans le domaine alimentaire, l'objectif du froid est de maintenir la qualité originale des produits en limitant ou en supprimant les altérations liées au développement des microorganismes, altérations très rapides dans les pays chauds à cause des conditions climatiques (température, humidité relative) qui sont favorables à la prolifération des bactéries, levures et moisissures.

Ce travail consiste à donner une synthèse bibliographique sur le froid industriel en général et les fluides frigorigènes, mais le plus important de ce travail est la présentation du dimensionnement d'un groupe frigorifique à eau glacée qui se trouve au sein de l'entreprise SARL Soummam Algérie.

I.1.Historique :

La laiterie Soummam est une entreprise algérienne créée en 1993 à AKBOU, elle a débuté son activité avec une capacité de production qui ne dépasse pas 20000 pots par jour avec 20 employés.

I.2.Situation géographique :

Entreprise familiale créée en 1993, la laiterie Soummam est implantée au nord de l'Algérie à 200 kms à l'Est de la capitale Alger et à 60 kms du chef-lieu de la wilaya de Bejaia, grande ville côtière abritant le 2^{ème} port commercial du pays.

I.3.Activité :

Soummam produit et commercialise du lait UHT (nature et aromatisé) des yaourts (en pots et en bouteilles), des fromages frais (nature et aromatisés), des spécialités laitières et autres desserts lactés.

I.4.Evolution de l'entreprise :

1993 : Création de la société avec un démarrage d'une seule ligne rénovée.

2000 :L'usine, dénommée SOUMMAM 1 a été installée dans la Zone industrielle TAHARACHT dans les environs d'AKBOU wilaya Bejaia.

2002 : Acquisition d'un nouveau terrain à côté de l'usine et construction d'un deuxième bâtiment SOUMMAM 2.

2005 : Acquisition d'un nouveau terrain à côté de l'usine et construction d'un troisième bâtiment SOUMMAM 3.

2008-2013 : Construction d'un 4eme bâtiment SOUMMAM 4.

2015 : la Construction d'un 5^{ème} bâtiment SOUMMAM 5.

I.5.Gamme :

Soummam dispose d'une riche gamme composée de plus de 40 références de produits différents se déclinant en une grande variété d'arômes, de fruits, d'emballages (pot, bouteille, Tétra pack) étude conditionnements (100g, 70g, 90g, 1l, 170 g, 100 ml ...).

I.6.Positionnement sur le marché Algérien :

Avec une production et une commercialisation de près de 500 000 tonnes/an et une capacité de production annuelle de plus de 700 000 tonnes/an, répartie sur deux sites de production, Soummam est le leader incontesté dans son créneau sur le marché Algérien avec une part de marché de plus de 50 %.

I.7.Réseau de distribution, moyens logistiques et humains :

La laiterie Soummam :

- Emploie plus de 1600 salariés permanents,
- Dispose de 2 sites de production d'une capacité cumulée de plus de 2000 tonnes/jour,
- Commercialise sa production à travers un réseau de distribution composé de :
 - 80 grands distributeurs agréés, conventionnés, distribuant exclusivement les produits Soummam,
 - 400 petits et moyens distributeurs " indépendants " dont la majorité commercialise exclusivement la gamme Soummam,
 - 5 établissements régionaux de vente gérés par l'entreprise elle-même.
- A alloué plus de 1200 camions frigorifiques et 110 chambres froides à son réseau de distribution.
- Dispose d'un parc machine de près de 30 lignes de production.

I.8.Collecte de lait :

Depuis 2009, la laiterie Soummam s'est lancée dans un ambitieux programme de collecte de lait frais :

- Plus de 40 centres régionaux de collecte sont opérationnels à ce jour,
- Quelques 4000 éleveurs livrent leur production à Soummam,
- 9000 génisses ont été distribuées aux éleveurs,
- Avec 500 000 litres collectés par jour, SOUMMAM s'érige en leader national de la collecte de lait frais en Algérie.

I.9.Description du groupe frigorifique :

Le groupe frigorifique à eau glacée de la laiterie SOUMMAM est équipé de :

- 4 Compresseurs en parallèles.
- 2 Tours de refroidissement.
- 2 Détendeurs « flotteurs ».
- Une bouteille BP comme un réservoir de l'ammoniac.
- 2 Ruisselleurs « évaporateurs ».
- Un réservoir d'eau glacée avec des hérces immergé [20].

Ces équipements sont présentés dans la figure I.1.

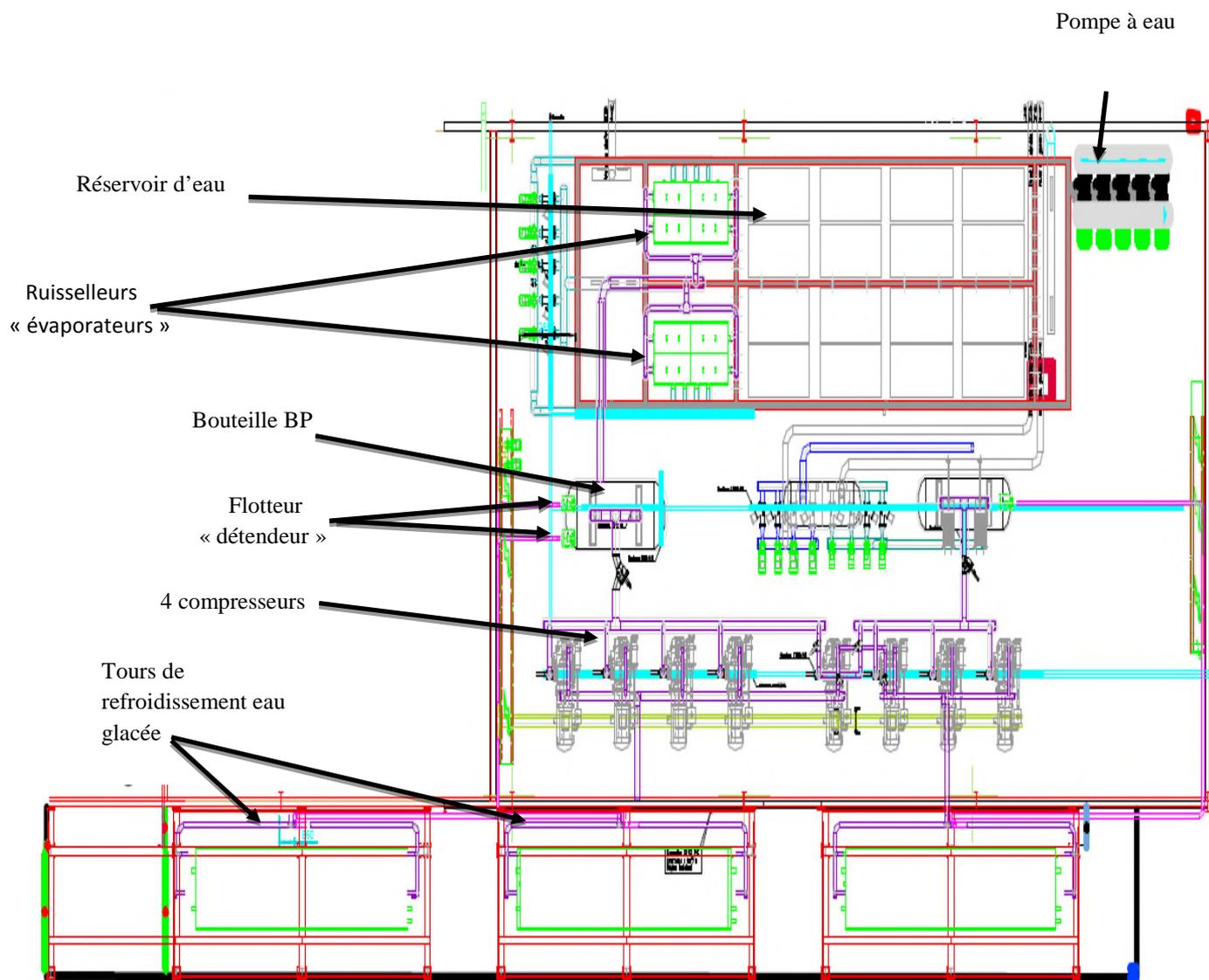


Figure I.1 : Groupe frigorifique à eau glacée [20]

II.1. La production du froid :

L'homme fut exposé depuis longtemps au problème de la conservation des aliments, ce qui l'a poussé à réfléchir pour trouver un moyen de les garder sous une basse température. C'est de là qu'est venue l'idée de produire du froid.

Qu'est-ce que la production du froid ?

La production du froid est la réalisation d'une opération contre nature, c'est-à-dire absorber de la température assez basse et la rejeter dans un milieu plus chaud, et pour cela comme l'expliquer très bien le deuxième principe de la thermodynamique, il faut consommer de l'énergie mécanique. [1]

II.2. Historique :

En 1857 Ferdinand carré réalise la première machine frigorifique à compression, la première machine à absorption et à fonctionnement continu (1860). Il est également le premier qui a utilisé l'ammoniac comme fluide frigorifique.

En 1876 Charles Tellier aménagea le premier navire à cales réfrigérées, qui a réussi à transporter sur le trajet Rouen Buenos Aires des viandes conservées en parfait état. [2]

II.3. Domaine d'utilisation du froid :

- **Domaine médical** : cryochirurgie, conservation de certains produits (organes..).
- **Industrie alimentaire** : conservation des aliments, pasteurisation des liquides.
- **Industrie chimique et pétrochimique** : liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinages, débenzolage...
- **Génie civil** : refroidissement des bétons, congélation des sols aquifères...
- **Conditionnement des locaux** : rafraichissement de l'air, conditionnement des patinoires canons à neige...
- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température (-80°C).
- **Les industries mécaniques** : pour le durcissement des matériaux ou le traitement des surfaces.

II.4. Les différents principes de production du froid :

Pour produire du froid il faut mettre en jeu des phénomènes endothermique, c'est-à-dire des phénomènes permettant une absorption de chaleur, il existe plusieurs techniques dont on peut citer :

- La dissolution de certains sels dans l'eau ;
- La fusion d'un corps solide ;
- La vaporisation d'un liquide ;
- La détente d'un gaz préalablement comprimé ;
- La sublimation d'un solide ;
- Le refroidissement thermoélectrique (effet Peltier, Thomson) :

L'effet Peltier Thomson consiste en un dégagement ou absorption de chaleur qui se produit quand un courant électrique circule dans un conducteur en présence d'un gradient de température [2].

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 frigorifique seront bithermes.

II.5. Les machines frigorifiques**II.5.1. les machines frigorifique à fluides liquéfiables****II.5.1.1. Les machines frigorifique à compression mécanique :**

- **Machines à un étage de compression mécanique :**

L'installation frigorifique à compression illustrée par la figure II.1 est la machine qui est la plus fréquemment utilise pour la production du froid. Ici on met à profit l'effet consistant en ce que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise.

Grace aux différentes pressions survenant lors de l'évaporation et de la condensation, les niveaux de température peuvent être ajustés de telle sorte qu'il se produise un transport de chaleur du coté froid vers le coté chaud.

Comme dans ce cas, l'agent réfrigérant circule dans un circuit fermé, on parle d'un cycle frigorifique. Au lieu du compresseur à piston présenté, on peut également utiliser des compresseurs à vis, des compresseurs scroll, des turbocompresseurs ou des compresseurs à éjection de vapeur. [3]

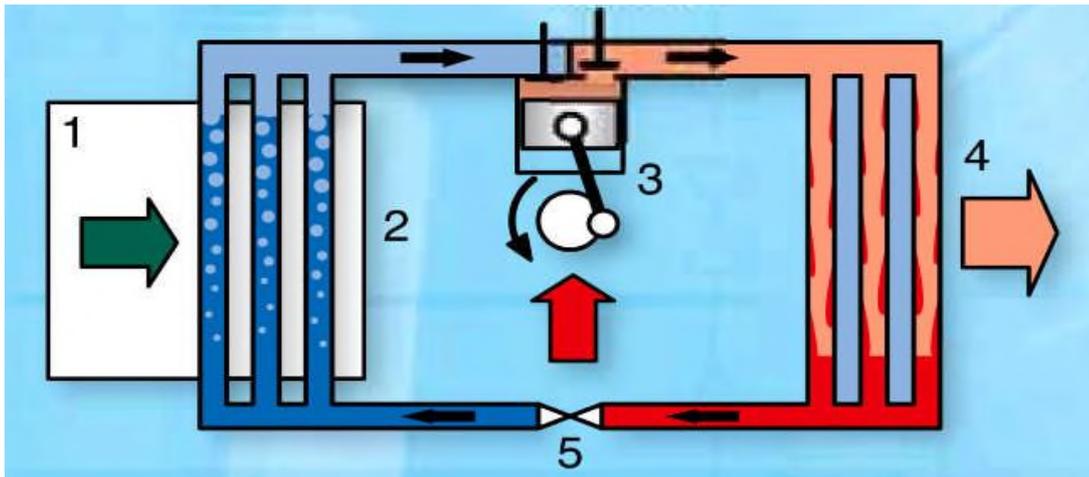


Figure II.1 : Machine à un étage de compression mécanique [4].

- **Machine à plusieurs étages de compression mécanique et à un seul fluide :**

L'augmentation de l'écart de température entre le condenseur et l'évaporateur d'une machine à un étage de compression mécanique peut être produite soit par ce que la température de condensation, θ_k s'élève, soit par ce que la température d'évaporation, θ_0 s'abaisse (production de froid à très basse température), cette augmentation conduit évidemment à une augmentation du taux de compression ($r = p_k/p_0$) du compresseur qui entrain les inconvénients sous cité :

- Diminution du rendement volumétrique,
- Diminution du rendement indiqué,
- Augmentation de la température de refoulement.

La solution donc est de fractionner la compression en deux ou plusieurs étages avec refroidissement des vapeurs entre les étages de compression.

- **Machine frigorifique fonctionnant en cascade :**

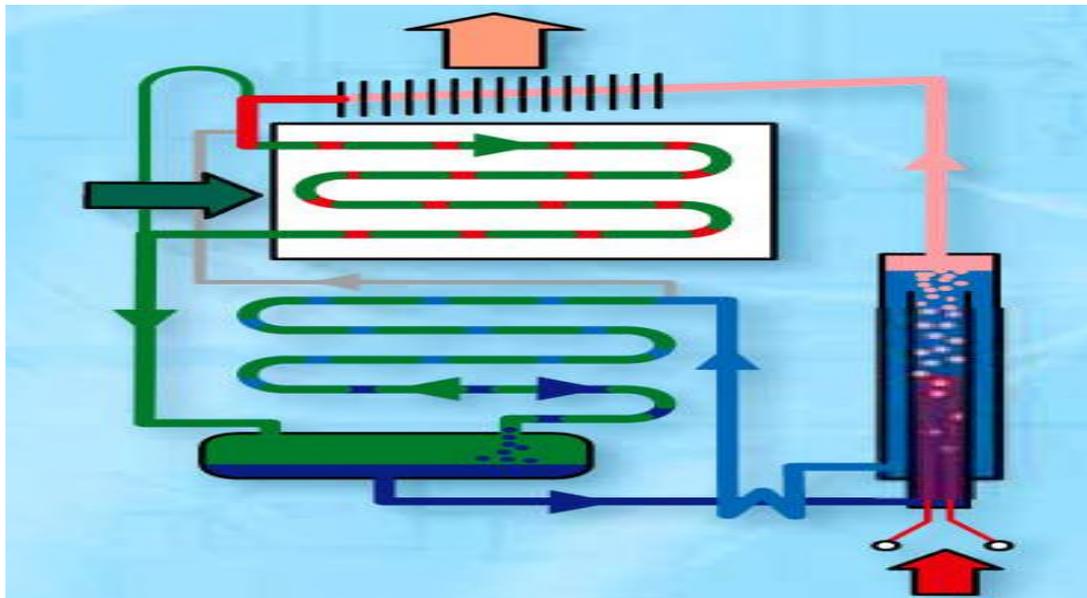
Une installation frigorifique en cascade comporte plusieurs machines frigorifiques élémentaires associées en série ; le condenseur de l'une cédant de la chaleur à l'évaporateur de celle qui la suit immédiatement dans le sens des températures croissant.

L'évaporateur de la première machine, la machine basse température, absorbe la chaleur dans le milieu à refroidir, le condenseur de la dernière, la machine haute température, est refroidi par les moyens naturels, eau ou air [5].

II.5.1.2. Machine à absorption :

La machine à absorption (figure II.2) renferme un fluide frigorigène et un solvant ou (absorbant). Si l'on met une solution refroidie et pauvre en fluide frigorigène, (solution pauvre, SP), en contact avec les vapeurs de ce fluide, elles les dissout, les absorbe et tend à se saturer. Ce phénomène crée donc un effet d'aspiration de ces vapeurs, comparable à l'aspiration d'un compresseur. Cette dissolution s'effectue dans un organe particulier de la machine, l'absorbeur.

Si d'autre part, on chauffe une solution riche en fluide frigorigène, (solution riche, RS), provoque un dégazage de cette solution, un départ sous forme de vapeur, du fluide frigorigène, ce phénomène est comparable au refoulement d'un compresseur, ce dégazage s'effectue dans un autre organe de la machine, le bouilleur [3].



- | | | | |
|---|------------------------|---|---------------------------|
|  | Vapeur du frigorigène. |  | Solution riche |
|  | Frigorigène liquide |  | Solvant (eau par exemple) |
|  | Solution pauvre |  | Mélange des deux fluides |

Figure II.2 : Machine a absorption [4].

II.5.2. Machine frigorifique à gaz froid :

L'installation frigorifique à gaz réfrigérant (Figure II.3) opérant selon le principe de Stirling est utilisée pour produire des températures très basses. On peut l'utiliser pour la condensation de l'air ou le refroidissement de caméras à infrarouge.

L'installation frigorifique à gaz froid correspond au moteur Stirling connu, sauf que le sens de la rotation est inversé. Ainsi le sens du passage du cycle est inversé et la machine motrice devient une machine productrice de travail.

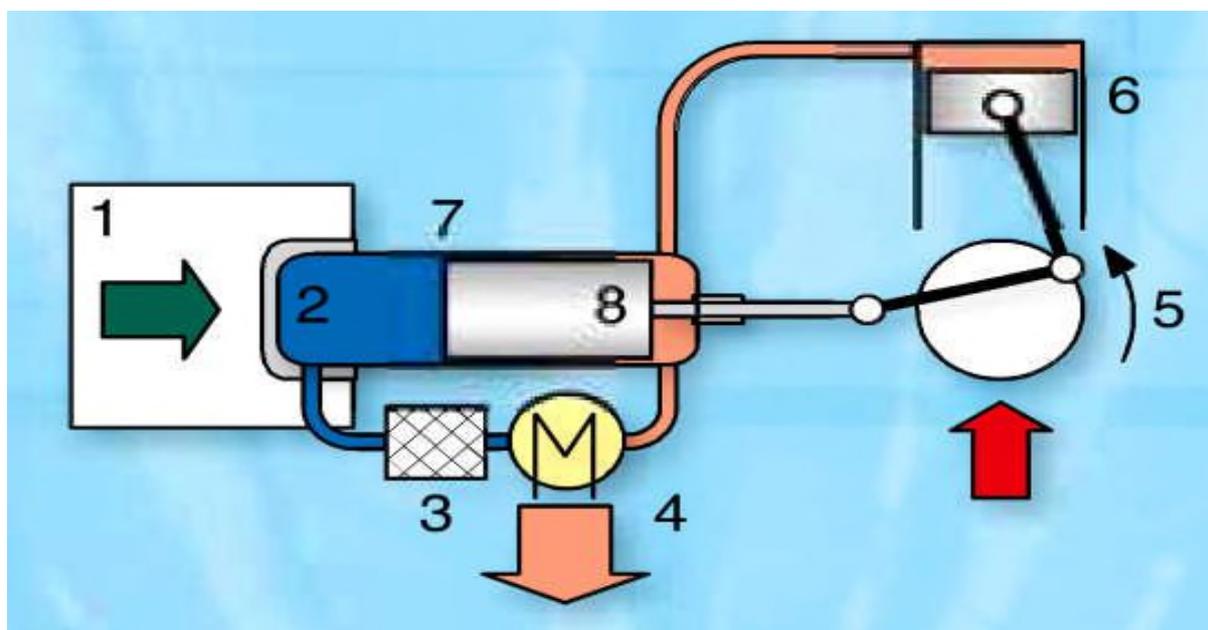


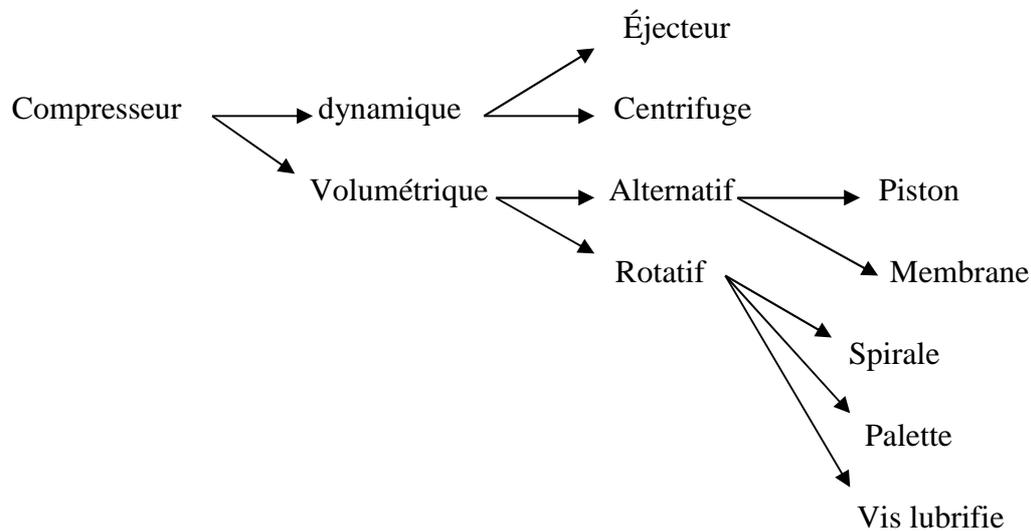
Figure II.3 : Machine à gaz froid [4].

II.6. Différents éléments d’une installation frigorifique :

II.6.1. compresseur :

Ce sont des machines pour comprimer et refouler du fluide frigorigène à l’état vapeur (gazeux) par un moyen mécanique.

Les différents types de compresseurs sont résumés dans le schéma suivant :



Parmi ces compresseurs on a :

1. Compresseurs volumétriques rotatifs :

Parmi ces compresseurs on a :

A. Compresseur à vis :

❖ Principe de fonctionnement :

- La compression du gaz dans un compresseur à vis est provoquée par la rotation des rotors mâles et femelles.

- Le volume utilisable dans la capacité fermé est réduit lorsque les deux rotors s'engrènent, poussant ainsi le gaz vers l'extrémité de refoulement de la machine et augmentant ainsi sa pression.

Ceci peut être montré schématiquement sur la figure II.5.

- La compression continue ainsi jusqu'à ce qu'un orifice se découvre. On général, les orifices de refoulement sont placés radialement et axialement à l'extrémité de sortie des rotors pour refouler le gaz vers l'échappement Figure 7.
- Au moment où la capacité fermée s'ouvre vers l'orifice de refoulement, la compression s'arrête (idéalement) et la charge de gaz est refoulée dans le collecteur de sortie [18].



Figure II.4 Les phases de compresseur à vis [18].

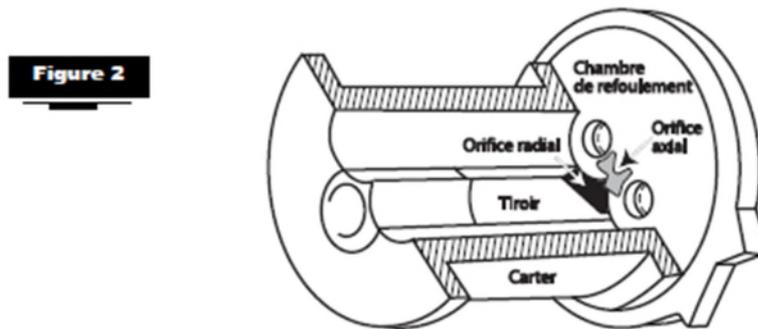


Figure II.5. Compresseur à vis [18].

B. Compresseur à palette :

Les palettes mobiles diminuent lors de la rotation le volume du fluide.

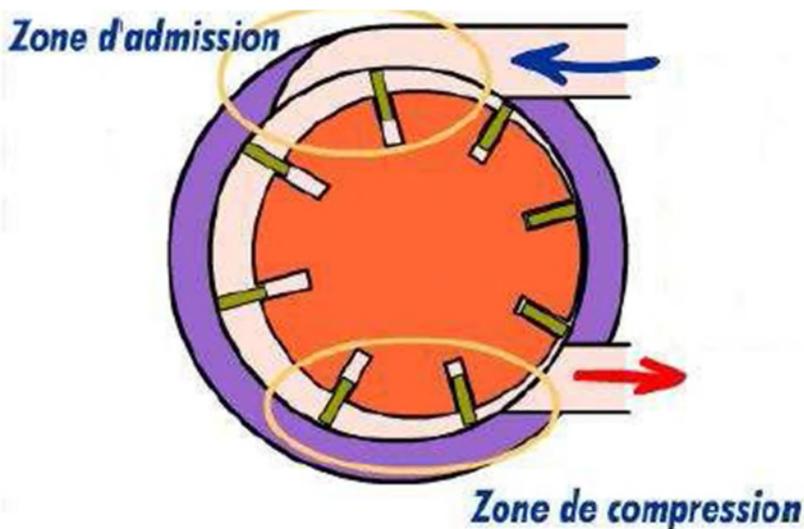


FIGURE II.6. Compresseur à palette [18].

2. Compresseurs volumétriques alternatifs :

A) Compresseur volumétrique à piston :

Ils sont utilisés dans tous les domaines d'industrie frigorifique.

C'est le type de compresseur le plus répandu pour comprimer l'air. Un moteur entraîne un système bielle / manivelle qui actionne un piston.

Dans sa course descendante, le piston aspire l'air extérieur et dans sa course montante, il le refoule vers le réservoir [18].

❖ Loi de calcul :

- Diagramme indiqué :

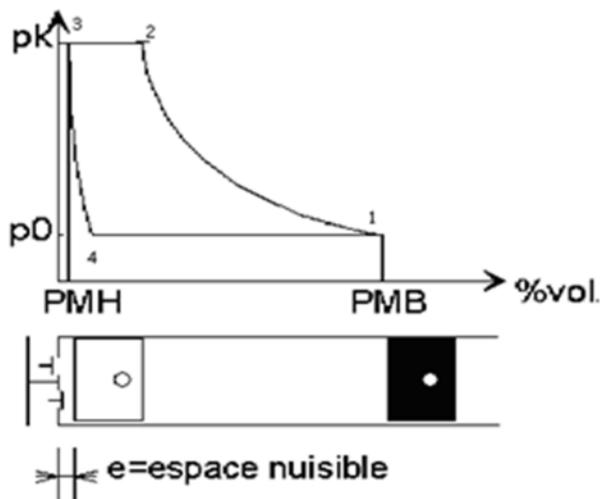


FIGURE II.7. Diagramme indiqué du piston [18].

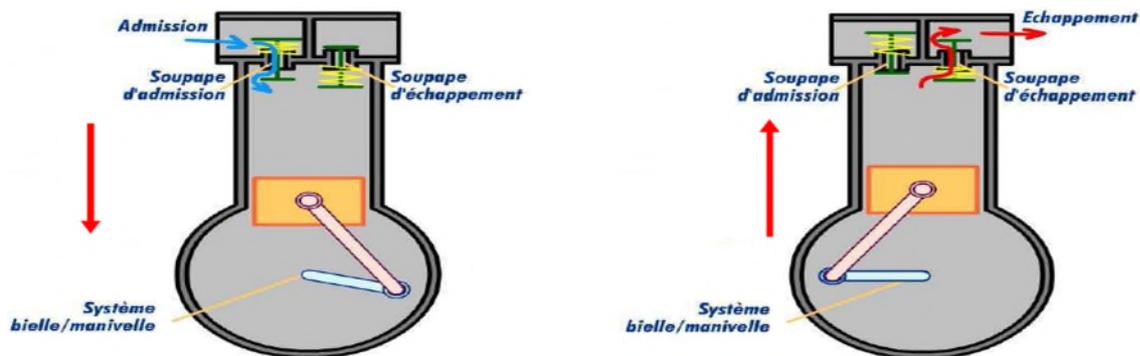


FIGURE II.8. Principe de fonctionnement d'un compresseur à piston [18].



FIGURE II.9. Compresseur à piston [18].

II.6.2. Détendeur :

Le détendeur est l'un des quatre éléments fondamentaux d'un circuit frigorifique. Il est installé entre les 2 tours de refroidissement et la bouteille BP.

Il abaisse la pression du fluide frigorifique.

Il régule la quantité de fluide dans l'évaporateur.

❖ Rôle de détendeur :

- Faire baisser la pression et la température du fluide frigorifique (passage de HP à BP).
- Réguler la quantité de fluide dans l'évaporateur (selon le type de détendeur).

❖ Type de détendeur :

1) **Détendeur capillaire** : est un tube de faible diamètre intérieur (de 0.6 à 2.8 mm) et d'épaisseur de 1 mm.

L'alimentation de l'évaporateur dépend uniquement de la perte de charge du tube capillaire.

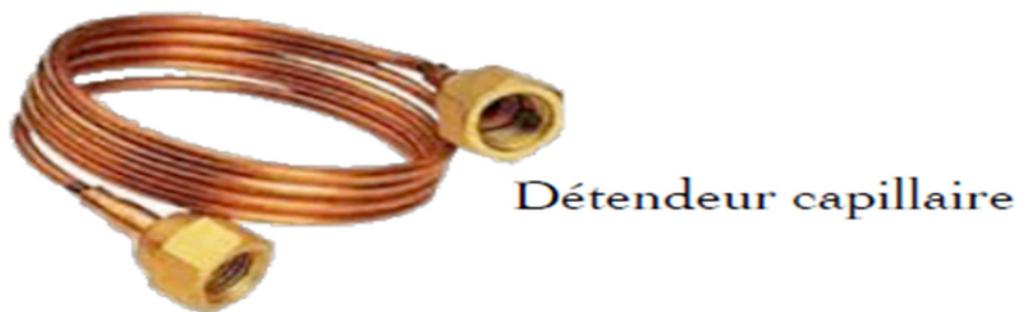


FIGURE II.10. Détendeur capillaire [17].

2) Détendeur thermostatique :

Assure l'alimentation de l'évaporateur en fluide frigorigène en tenant compte de sa charge thermique (la quantité de chaleur à absorber) pour maintenir une surchauffe constante, le bulbe de détendeur est positionné à la sortie de l'évaporateur.

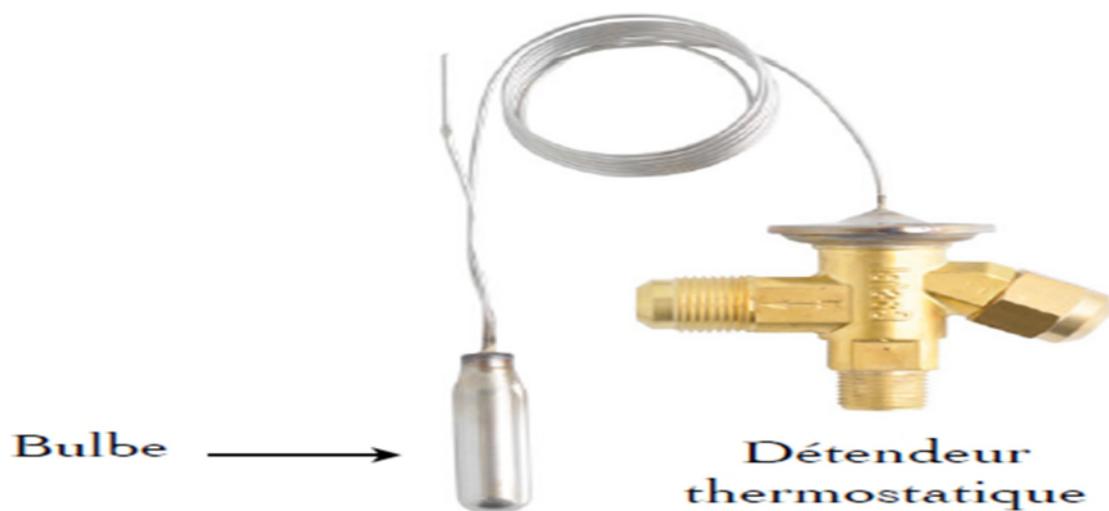


FIGURE II.11. Détendeur thermostatique [17].

3) Détendeur à commande électrostatique :

Le détendeur est piloté par un moteur pas à pas, soulevant ou abaissant un pointeau dans une buse étroite de manière à alimenter correctement l'évaporateur de la machine. [17]



FIGURE II.12. Détendeur électrostatique. [17].

II.6.3. Condenseur :

C'est un élément dans lequel le fluide frigorigène gazeux, après compression se condense à température constante en libérant dans le médium (air ou eau) la chaleur récupérée à l'évaporateur en plus de la chaleur de compression

Le condenseur se divise en trois parties délimité par les paramètres de fonctionnement :

- La zone de désurchauffe.
- La zone de condensation.
- La zone de sous refroidissement. [19]

Comme la présente la figure II.13.

❖ Rôle de condenseur :

- Il permet l'échange de chaleur entre le fluide et le milieu extérieur.
- Il assure le changement d'état du fluide frigorigène sous haute pression.
- Il assure la désurchauffe et le sous-refroidissement du fluide.

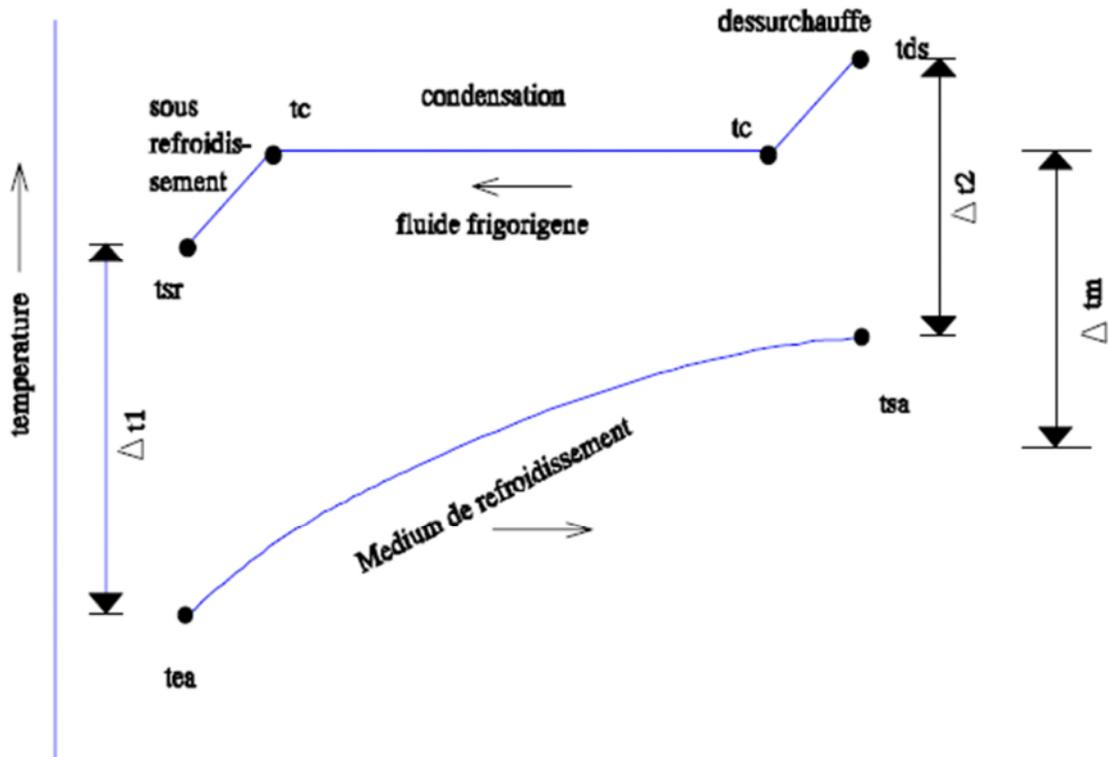


FIGURE II.13. Les trois zones de fonctionnement d'un condenseur. [11]

II.6.3.1. Condenseur à air :

Ils sont très répandus pour les petites et moyennes puissances car l'air est une source naturelle et gratuite, la puissance calorifique échangée entre les deux fluides.

II.6.3.2. Les condenseurs à eau :

- **Condenseurs horizontaux multitubulaires :** ce sont les plus utilisés, car ils sont faciles à installer, et assez facile à nettoyer mécaniquement, car les fonds à eau sont démontables
- **Condenseurs verticaux multitubulaires :** ces appareils sont surtout utilisés dans les installations à l'ammoniac lorsque les eaux de refroidissement sont très « chargées ». Ils sont en voie de disparition.
- **Condenseurs à plaques :** cette technologie plus récemment utilisées fait appel aux échangeurs à plaques du type brasé, plaques et joints, plaques soudées en cassettes, plaques rondes entièrement soudées, platulaire. Le choix sera fonction du fluide frigorigène, de la nature de l'eau, de la pression de service.

II.6.3.3. Condenseur évaporatifs ou évapo-condenseurs :

Les évapo-condenseurs sont très largement utilisés dans le froid industriel car ils combinent, en un appareil, un condenseur et une tour de refroidissement, et conduisent à des températures de condensation plus basses.

II.6.4. Evaporateur :

Dans toute machine frigorifique, l'évaporateur est l'appareil qui sert à prélever la chaleur à une source froide.

On ne pourra jamais dissocier un évaporateur de son système d'alimentation en fluide frigorigène. De plus, chaque appareil selon sa technologie propre, est justiciable d'un système de détente particulier.

Par ailleurs, on trouve deux types d'évaporateurs selon la nature du fluide à refroidir : refroidisseurs d'air et refroidisseurs de liquides.

II.6.4.1. Evaporateurs à refroidisseurs d'air :

- **Evaporateurs à circulation d'air naturelle** : ces appareils peuvent être installés au plafond des chambres ou contre les parois (murales).

Ils sont utilisés lorsque l'on veut réaliser un très faible mouvement d'air et d'un degré Hygrométrique élevé dans les chambres positives.

- **Evaporateurs ventilés** : ils sont de loin les plus répandus, de puissance unitaire allant de quelques kilowatts à 150 kW environ.

Ils comportent la batterie, les ventilateurs, la tôlerie et la cuvette.

II.6.4.2. Evaporateurs à refroidisseurs du liquide : on distingue 4 catégories :

- **Evaporateurs immergés** : Ils sont constitués par un ensemble de serpentins ou de tubes horizontaux ou verticaux.

- **Evaporateurs multitubulaires noyés** : ces appareils sont très utilisés pour le refroidissement d'eau glacée avec des compresseurs centrifuges ou à vis utilisant des fluides halogénés.

- **Evaporateurs à détente directe :** dans un évaporateur à détente directe, la circulation du fluide frigorigène s'effectue à l'intérieur des tubes, alors que le liquide à refroidir circule coté calandre. Ils sont utilisés essentiellement avec les fluides HFC
- **Evaporateurs à plaques :** ils sont de construction analogue à celles des condenseurs à plaques et du type brasé, plaques et joints, plaques soudées en cassettes, plaques rondes entièrement soudées [4].

II.7. les différentes performances frigorifiques : [5]

- **Débit massique de l'installation :**

$$q_m = \frac{\Phi_0}{h_6 - h_5}$$

q_m : débit massique [kg/s].

Φ_0 : la charge frigorifique [kW]

h : enthalpie massique [kJ/kg].

- **Rendement indiqué du compresseur :**

$$\eta_i = 1 - 0.05 \times \frac{H_p}{B_p}$$

η_v : rendement volumique du compresseur.

$\frac{H_p}{B_p}$: Taux de compression.

- **Rendement effectif du compresseur :**

$$\eta_{eff} = 0.8 - .0.004 \times (\tau - 5)^2$$

- **Puissance théorique du compresseur :**

$$P_{th} = q_m \times (h_{2th} - h_1).$$

- **Puissance rejetée au condenseur :**

$$\Phi_k = q_m (h_2 - h_3).$$

- **Coefficient de performance :**

$$COP = \frac{\Phi_0}{P_{eff}}$$

P_{eff} : puissance effective du compresseur ;

- **Puissance effective du compresseur :**

$$P_{eff} = \frac{P_{th}}{\eta_{eff}}$$

P_{th} : Puissance théorique du compresseur ;

III.1. Définition :

Les fluides frigorigènes sont des substances ou un mélange de substance utilisés dans les circuits de système frigorifique tel que : des chambres froides, des réfrigérateurs, des vitrines réfrigérées.

Les fluides frigorigènes ont la particularité d'avoir sous la pression atmosphérique une température d'évaporation très faible, cette propriété thermodynamique permet de produire de froid ou de chaude. [6]

III.2. Les différents types du fluide frigorigène :

On distingue quatre famille des fluides frigorigène, les substances inorganique pure, les hydrocarbures, les hydrocarbures halogènes, les autre produits.

Ils sont représentés dans les tableaux (III. 1 et III. 2).

III.2.1. Les substances inorganiques pures :

Parmi les composés inorganiques pures on trouve :

1. L'ammoniac R717 :

C'est un fluide incolore à odeur piquante et irritante, sa température d'ébullition est de -33. 4°C sous la pression atmosphérique normale (1.013 bar).

L'ammoniac est un produit classé toxique est inflammable [7].

2. Dioxyde de carbone R744 :

Il s'agit d'un gaz asphyxiant plus lourd que l'aire (il s'accumule dans les locaux mal ventilés). Indépendamment ses propriétés asphyxiantes.

Le dioxyde de carbone possède une toxicité propre. Les premiers effets peuvent se manifestes à partir de 2% dans l'atmosphère [8].

III.2.2. Les hydrocarbures :

Dans ce groupe en trouve :

1. Le butane R 600 ;
2. Isobutane R 600a ;
3. Le propane R 290 ;
4. Le cyclopropane RC 270 ;

Tous ces produits sont stables à température ambiante [9].

III.2.3. Les hydrocarbures halogène :

Dans ce groupe peuvent se trouver des composées qui ont été très largement utilisé mais qui font désormais l’objet d’interdiction, notamment pour des raisons de toxicité environnementale, on a :

1. Les CFC (chlorofluorocarbone) :

Ce sont les plus connus des hydrocarbures halogènes. Complètement substitué par le chlore ou le fluor, ces fluides ne contiennent plus d’hydrogène, ils sont dangereux pour la couche d’ozone.

Les CFC font l’objet d’interdiction totale depuis l’an 2000.

Tableau III.1. Quelques fluides de famille de CFC [8].

CFC
R 11
R 12
R 113
R 115
R 502

2. Les HCFC (hydro chlorofluorocarbone) :

Il s’agit de la seconde génération d’hydrocarbure halogène utilisé en tant que fluides frigorigènes. Ce sont des composants chimiques formés de chlore, fluor, d’hydrogène et de carbone, ils sont dangereux pour l’environnement. Les HCFC ont fait l’objet d’interdiction totale en 2015.

Tableau III.2. Quelques fluides de famille HCFC [8].

HCFC	
R 21	R 142b
R 22	R 401A
R 123	R 402A
R 124	R 408A

Les HFC (hydro fluorocarbures) :

Il s'agit de la troisième génération d'hydrocarbures halogènes utilisé en tant que fluides frigorigène. Ce sont des composées de fluor, d'hydrogène et de carbone. Il ne présente pas de danger pour la couche d'ozone mais ils peuvent contribuer à l'effet de serre. [8].

Tableau III.3. Quelques Les fluides de famille HFC [8].

HFC	
R32	R404A
R125	R407C
R134a	R410A
R143a	R507
R152a	

Et en trouve deux types de ce groupe des fluides frigorigènes :

1. Mélange azéotropique :

C'est un mélange entre 2 ou plusieurs fluides purs avec les mêmes paramètres (température d'ébullition et de condensation) et parmi ces fluides en trouve R507 (50% R125 et de 50% de R143a).

2. Mélange non azéotropiques :

C'est un mélange entre 2 ou plusieurs fluides purs mais avec des différents paramétrés, parmi ces fluides en trouve R 404A (52% de 44% R 143a et de R 125 et de 4% de r 134a) [12].

Tableau III.2. Description des principaux fluides frigorigènes [9].

Codification	Dénomination	Composition ou formule chimique	Classement de sécurité
////////////////////	////////////////////	Pourcentage massique	////////////////////
Composé inorganique			
R 717	L'ammoniac	NH ₃	B2
R718	L'eau	H ₂ O	A1
R 744	Dioxyde de carbone	CO ₂	A1
Composés organiques			
Hydrocarbures			
R 170	Ethane	CH ₃ CH ₃	A3
R 290	Propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	A3
R 600a	isobutane	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	A3
Hydrocarbures halogènes			
Chlorofluorocarbures CFC			
R 11	Trichlorofluorométhane	CCl ₃ F	A1
R 12	Dichlorodifluorométhane	CCl ₂ F ₂	A1
Hydro chlorofluorocarbures HCFC			
R 22	Chlorodifluorométhane	CHClF ₂	A1
R 141b	1,1-Dichloro-1-Fluoroéthane	CH ₃ CCl ₂ F	A2
R 142b	1-Chloro-1,1-Difluoroéthane	CH ₃ CClF ₂	A2

Hydro fluorocarbures HFC			
R 32	Difluorométhane	////////////////////	A2
R 125	Pentafluoroéthane	////////////////////	A1
R 134a	1,1,1,2- tétrafluoroéthane	////////////////////	A1
R 143a	1.1.1trifluoroéthane	////////////////////	A2
R 152a	1,1Difluoroéthane	////////////////////	A2
Mélange azéotropique			
R502	////////////////////	R22, R115 (48.8, 51.2)	A1
R 507	////////////////////	R125, R143a (50, 50)	A1
Mélange non azéotropique			
R 404A	////////////////////	R125, R134a, R143a (44, 52, 4)	A1
R407C	////////////////////	R32, R125, R134a (23, 25, 52)	A1
R 410A	////////////////////	R32, R125 (50, 50)	A1

III.2.4. Autre fluides :

Certains fluides frigorigènes ont pu être utilisés ou sont utilisés de façon très ponctuelle et rare ainsi on pourra trouver :

1. Les éthers ;
2. Les amines aliphatiques ;
3. Les alcools ;
4. Composés tri halogènes ; [9].

Tableau III.3. Description d'autres fluides frigorigènes utilisés dans le froid [9].

Nom	Formule	désignation	Propriété importante	N° fiche toxicologique de l'INRC
Ether di méthylique	CH ₃ -O- CH ₃	////////////////////	Inflammabilité élevé	////////////////////
Ether di éthylique	C ₂ H ₅ -O- C ₂ H ₅	////////////////////	Inflammabilité élevé	FT10
Méthyle amine	CH ₃ NH ₂	R 630	////////////////////	////////////////////
Ethylamine	C ₂ H ₅ NH ₂	R 631		FT134
Méthanol	CH ₃ OH	////////////////////	Inflammabilité élevé	FT5
Ethanol	C ₂ H ₅	////////////////////	Inflammabilité élevé	FT48
Bromochlorodifluorométhane	CBrClF ₂	R 12B1	////////////////////	FT165
Bomotrifluorométhane	CBrF ₃	R 13B1	////////////////////	FT163

III.3. Nomenclature et les critères de choix :

III.3.1. La nomenclature :

La nomenclature des fluides frigorigènes donnée par la norme ANSI/ASHRAE34.

Cette classification permet de classer de façon claire et univoque la totalité des fluides frigorigènes.

Le code d'identification comprend un préfixe constitué de lettres et de suffixe constitué chiffres [13].

On définit R WXYZW :

W : nombre d'instauration carbone ;

X : Nombre d'atome de carbone -1 ;

Y : Nombre d'atome d'hydrogène +1 ;

Z : Nombre d'atome de fluore ;

Série R 400- R 500 :

R 400 : mélange non azéotropique (présentant un glissement de température plus ou moins important, suivant le mélange).

Série R 500 : mélange azéotropique (absence de glissement de température pour une composition bien précise de mélange).

Les numérotations sont chronologiques dans l'ordre de l'acceptation du fluide par l'ASHR17E.

Série R 600 :

R 600 (butane), R 600a (isobutane).

Composés oxygénés R 610 (éthyle éther).

Composés azotés R 630 (méthyle amine).

Série R 700 :

Composé inorganiques.

La numérotation commence par 7 suivis de 2 chiffres correspondant a la masse molaire du composé. [14].

III.3.2. Les critères du choix :

Pour choisir un fluide frigorigène en vue d'une application déterminée, on doit considérer :

1. Critères thermodynamiques :

Ces critères consistent principalement le constructeur de machine.

- La pression d'évaporation est nécessairement supérieure à la pression normale pour éviter les entrées d'air et d'humidité. La température d'ébullition doit être inférieure à la température d'évaporation.
- Température critique importante, la température de condensation doit être inférieure à la température critique.
- L'échauffement à la compression doit être réduit donc le coefficient de compression τ aussi petit que possible.
- Production frigorifique volumétrique spécifique : c'est la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur rapporté à l'unité du volume de vapeur aspiré au niveau du compresseur, désigné par $\Phi_{0v} = (h_6 - h_5) / V''_1$ elle doit être aussi grande que possible.
- La condensation sera d'autant plus aisée que la chaleur massique de la vapeur saturante est faible [5].

2. Critère technique :

- Action sur les métaux.
- Action sur les matières plastiques.
- Action sur les huiles de graissage.
- Comportement en présence de l'eau.
- Efficacité des échanges thermiques.
- Aptitude de fuite.

3. Critère de sécurité :

- Bonne stabilité chimique, compte tenu de l'importance des écarts de température auxquels ils sont soumis à chaque cycle.

- Sécurité alimentaire ; en cas de fuite, inactivité sur les denrées, non nocif pour le personnel, facilement détectable.
- Ininflammabilité et in explosibilité (non explosif) en cas de mélange avec l'air.

Les frigorigènes ont été classés selon leur toxicité inflammabilité par la norme EN 378-1 de la manière suivante :

- a) **Inflammabilité** : il existe trois groupes basé sur la limite inférieure de l'inflammabilité à la pression atmosphérique et à la température ambiante :
- Groupe 1 : non inflammable quel que soit la concentration dans le locale.
 - Groupe 2 : frigorigène dont la limite inférieure de l'inflammabilité est supérieure ou égale à 3.5% en volume par volume d'air.
 - Groupe 3 : frigorigène dont la limite inférieure d'inflammabilité est inférieure à 3.5% en volume par volume d'air.
- b) **Toxicité** : les fluides frigorigènes sont répartir en deux groupes :
- Groupe A : fluide frigorigène dont la concentration moyenne égale ou supérieure à 400ml/m³ n'a pas d'effets défavorables sur presque tous les travailleurs qui peuvent être exposés jours après jours pendant 8 heures et une semaine de travail de 40 heures.
 - Groupe B : fluides frigorigène dont la concentration moyenne inférieure à 400ml/m³ n'a pas d'effet défavorable sur presque tous les travailleurs qui peuvent être exposé jours après jours pendant 8 heures et une semaine de travail de 40 heures. [14].

Les fluide frigorigène sont finalement classés en 6 groupes au regard de la sécurité (norme FDE35430) présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Groupes des sécurités pour les fluides frigorigènes [15].

Hautement inflammable	A3	B3
Moyennement inflammable	A2	B2
Faiblement inflammable	A1	B1
	Faiblement toxique	Fortement toxique

Et dans le tableau suivant, le classement de quelques fluides frigorigènes :

Tableau III.5. Classement quelque fluide frigorigène [15].

Frigorigène	Groupe
R 134a	A1
R 22	A1
R 717	B2
R 125a	A2

4. **Critère économique :**

- Un prix devient faible.
- Disponibilité pour la recharge du circuit ou remplacement imposé par législation.
- Le transport aisé.
- Un système de stockage simple.

Sur la base des quatre critères, c'est évident que c'est les CFC et les HCFC qui vont être sélectionnés mis à part l'ammoniac qui va être leur concurrent grâce à son COP et sa production volumique importante.

III.4. L'impact des fluides frigorigènes :

Les fluides frigorigènes influences soit sur l'environnement, la santé, la sécurité, et le bilan énergétique.

III.4.1. l'impact sur l'environnement :

A cause de fuites importantes au niveau des circuits frigorifiques et l'utilisation des fluides frigorigènes dangereux on trouve de la destruction de la couche d'ozone et l'augmentation d'effet de serre.

❖ **Indice d'impact :**

Pour établir l'impact des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone et l'effet de serre, trois indices principaux ont été définis :

1. ODP : Ozone déplétion potentiel :

C'est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'appauvrissement de la couche d'ozone.

On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence, exemple R11 ou R12 qui ont ODP=1.

2. GWP : Globale warning potentiel :

C'est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'effet de serre. On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence. Exemple CO₂, et pour des durées bien déterminées (20, 100, 500 ans), le CO₂ à un GWP=1

3. TEWI : Totale equivalent warning impact :

Est un concept permettant de valoriser réchauffement de la terre durant la vie opérationnelle d'un système de réfrigération, utilisant un fluide frigorigène déterminé en tenant compte de l'effet direct dû aux émissions de fluide frigorigène et à l'effet indirect dû à l'énergie requise pour faire fonctionner le système.

A titre indicatif, il est donné par la formule suivante :

$$TEWI = (GWP * L * n) + (GWP * m * [1 - c]) + n * E * \beta \text{ tel que :}$$

GWP : Globale warning potentiel ;

L : émission annuelles de fluide en kg ;

n : durée de vie de système en années ;

m : charge en fluide frigorigène en kg ;

l : facteur de récupération, recyclage compris entre 0 et 1 ;

E : consommation annuelle d'énergie en [kWh] ;

B : émission de CO₂ en [kg/kWh] ;

III.4.2. l'impact sur la santé et la sécurité :

L'utilisation des fluides frigorigènes dans les bâtiments n'est pas sans risque sur la santé et la sécurité des occupants, des équipes de maintenance.

En effet ils peuvent représentés un risque en raison de leur :

- Toxicité comme l'ammoniac NH_3 ;
- Inflammabilité comme le R 290 et l'ammoniac ;
- Des pressions utilisées dans les circuits HP (haute pression) ;

III.4.3. L'impact sur le bilan énergétique :

Les différents fluides frigorigènes ne sont pas égaux devant le froid. Certains ont une meilleure efficacité frigorifique que d'autre ; c'est pourquoi il est important d'évaluer leur différence.

En comparant, par exemple, le R22 le R134a et le R507, on se rend compte que toute chose restante égale (puissance frigorifique, température d'évaporation et de condensation identique).

R404A donne des meilleures performances énergétiques que le R22. [15].

III.5. Propriétés chimiques et physiques d'ammoniac :

L'ammoniac est un produit classé toxique est inflammable, dont les propriétés suivants :

A. Les propriétés physiques :

Tableau III.6. Propriétés physique de l'ammoniac [10].

Masse molaire	17.03
Point de fusion	-77.7 °C
Points d'ébullition	-33.5 °C
Densité (ammoniac liquide)	0.682 à 33.3 °C
Température critique	132.35 °C
Densité de vapeur	0.59

Tension de vapeur	860kPa à 20 °C
Température d'auto inflammabilité (% en volume)	651 °C
Limites d'explosivités dans l'air (% en volume)	
Limite inférieure	15%
Limite supérieure	28%

Limites d'explosivités dans l'oxygène (% en volume)	
Limite inférieure	15.5%
Limite supérieure	79%

B. Propriétés chimique :

A une température ordinaire, l'ammoniac est un composé stable. Sa dissociation en hydrogène et azote ne commence que vers 450 – 550 °C.

En possède de certains métaux comme le fer, le nickel, le zinc et l'uranium. Cette décomposition commence dès 300 °C et est presque complète vers 300 – 600 °C.

L'ammoniac brûle à l'air au contact d'une flamme en donnant principalement de l'azote et de l'eau.

L'ammoniac réagit généralement violemment sur de nombreux oxydes et peroxydes.

Les halogènes (fluor, chlore, brome et l'iode), réagissent vivement sur l'ammoniac et ces solutions aqueuses.

Des réactions explosives peuvent également se former avec l'aldéhyde. L'acide hypochloreux l'hexacyanoferrate (3⁻) de potassium.

La pluparts des métaux ne sont pas attaqués par l'ammoniac rigoureusement anhydre toute fois on présence d'humidité. L'ammoniac gazeux ou liquide attaque rapidement le cuivre le zinc et de nombreux alliages particulièrement ce qui contient du cuivre il agit également sur l'or, l'argent et le mercure en donnant des composés explosifs. [10]

III.6. Propriétés physiques et chimiques du R134a :

- Etat physique : gaz liquéfié ;
- Couleur : incolore ;
- Odeur : légèrement éthérée ;
- PH : non applicable ;
- Point de fusion : -101°C ;
- Température d'ébullition : -26.4°C ;
- Température critique : 101°C ;
- Pression critique : 4070 [k Pa] ;
- Pression de vapeur : 5.7 [bar] absolu à 20°C ;
13.2 [bar] absolu à 50°C ;
- Densité de vapeur (air = 1) : 3.6 ;
- Masse volumique : 1226 [kg/m^3] à 20°C ;
1103 [kg/m^3] à 50°C ;

[16].

Introduction

Avant de déterminer le cycle de fonctionnement, il faut calculer la charge frigorifique nécessaire qui est conditionnée par les besoins de notre complexe, dans les conditions les plus défavorables (la journée la plus chaude de l'année).

IV.1. Etude du groupe frigorifique à ammoniac :

Le problème de toxicité et de la raison économique de l'ammoniac, nous à imposer un fluide frigoporteur (eau) qui véhiculera le froid vers les cellules de refroidissement.

IV.1.1 La charge de l'installation :

- **Présentation de l'installation :**

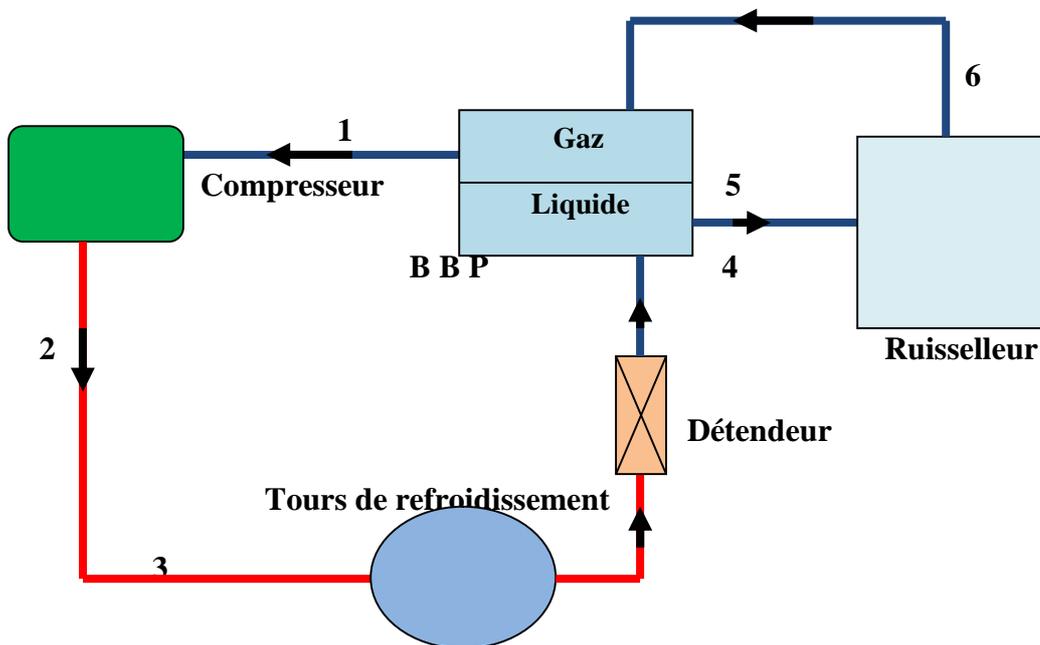


FIGURE IV.1. Schéma de l'installation

Le point 1 : Représente l'état de vapeur légèrement surchauffé de l'ammoniac à l'entrée du compresseur, la température en ce point est de -3°C

De 1 à 2 (ou à 2') : le fluide est comprimé de $p_1 = 3.5$ bar jusqu'à $p_2 = 11$ bars,

De 2 à 3 : le fluide se refroidit jusqu'à la température de condensation T_k puis se condense dans les tours de refroidissement,

De 3 à 4 : détente isenthalpique du fluide dans le détendeur de p_3 jusqu'à p_4 avec $h_4 = h_3$,

De 5 à 6 : évaporation du fluide frigorigène sous la pression p_1 et à la température T_1 . L'effet utile de cette transformation est d'extraire de la chaleur à l'eau glacée au niveau de l'échangeur à plaques appelé « ruisselleur ».

IV.1.2. Calculs thermodynamiques dans le cas le plus défavorable :

Il s'agit d'effectuer le calcul pour la journée la plus chaude

$T_{\text{ambiante}} = 50^{\circ}\text{C}$: Température extérieure ;

$T_{\text{Refoulement}} = 1^{\circ}\text{C}$: température de refoulement d'eau glacée ;

$T_{\text{retour}} = 7^{\circ}\text{C}$: température de retour d'eau glacée ;

$q_{v\text{ eg}} = 715 \text{ m}^3/\text{h}$: débit volumique d'eau nécessaire ;

$$q_m = \rho_{\text{eg}} q_{v\text{ eg}} = 1000 \frac{715}{3600} ; \dots\dots\dots(\text{IV.1})$$

$\rho_{\text{eg}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$: masse volumique de l'eau ;

$q_m = 198.61 \text{ kg}/\text{s}$: débit massique d'eau nécessaire ;

• **La charge frigorifique :**

$$\Phi_0 = C_{\text{eau}} q_m \Delta T \dots\dots\dots(\text{IV.2})$$

Avec : $\Delta T = 6^{\circ}\text{C}$; $C_{\text{eau}} = 4.1855 \text{ [kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C]}$

$$\Phi_0 = 4.1855 \cdot 198.61 \cdot 6.$$

$$\Phi_0 = 4987.69 \text{ [kW]}.$$

- **Caractéristiques thermodynamiques aux différents points du cycle.**

TABLEAU IV.1. Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle R717.

Points	Température T [°C]	Pression P [bar]	Enthalpie h [kJ/kg]	L'entropie S [kJ/kg K]	Volume massique V [m ³ /kg]
1	-3	3.5	1455.86	5.652	0.32
2s	71.5	11	1607	5.652	0.15
3	28	11	334.93	1.4655	0.002
4	-3	3.5	334.93	1.5145	0.039
5	-3	3.5	334.93	1.5145	0.039
6	-3	3.5	1455.86	5.6292	0.32

➤ Au point 4 on a un titre de vapeur est égal à :

$$X_4 = \frac{h_4 - h_{4liq}}{h_{4vap} - h_{4liq}} \quad \text{Et } X_4 = \frac{S_4 - S_{4liq}}{S_{4vap} - S_{4liq}} \dots\dots\dots(IV.3)$$

$h_{4liq} = 186.32$ [kJ/kg], $h_{4vap} = 1455.86$ [kJ/kg]

$X_4 = 0.12.$

$S_{4liq} = 0.9499$ [kJ/kg K], $S_{4vap} = 5.6550$ [kJ/kg K].

$S_4 = 1.5145$ [kJ/kg K]

- **Débit d'ammoniac nécessaire :**

D'après le bilan énergétique d'un échangeur est :

$$q_{m(eg)} C_{eg} (T_{ref} - T_{ret})_{eg} = q_{m(NH3)} (h_6 - h_5) \dots\dots\dots(IV.4)$$

Avec :

$q_{m(NH3)}$: débit massique d'ammoniac nécessaire ;

C_{eg} : capacité calorifique de l'eau glacée ;

T_{ref} : température de refoulement d'eau glacé de l'échangeur ;

T_{ret} : température de retour d'eau glacé dans l'échangeur ;

Et de la :

$$q_{m(NH_3)} = \frac{\Phi_0}{h_6 - h_5} = \frac{4987.69}{1455.86 - 334.93}$$

$$q_{m(NH_3)} = 4.45 \text{ kg/s.}$$

• **Puissance mécanique du compresseur :**

a) **Puissance théorique :**

$$P_{th} = q_{m(NH_3)} (h_{2th} - h_1) \dots \dots \dots (IV.5)$$

Tel que

h_1 : l'enthalpie du point 1;

h_{2th} : l'enthalpie théorique du point 2 ;

P_{th} : puissance théorique du compresseur ;

Donc :

$$P_{th} = 4.45 (1607 - 1455.86)$$

$$P_{th} = 672.573 \text{ [kW]}$$

• **Taux de compression τ :**

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{11}{3.5}$$

Tel que :

p_2 : La pression d'ammoniac à la sortie des compresseurs.

p_1 : La pression d'ammoniac à l'entrée des compresseurs.

$$\tau = 3.143$$

• **Le rendement volumétrique du compresseur :**

$$\eta_v = 1 - 0.05 \tau \dots \dots \dots (IV.6)$$

$$\eta_v = 1 - 0.05 \cdot 3.143$$

$$\eta_v = 0.84$$

- Rendement indiqué :

$$\eta_i = \eta_v$$

$$\eta_i = 0.84$$

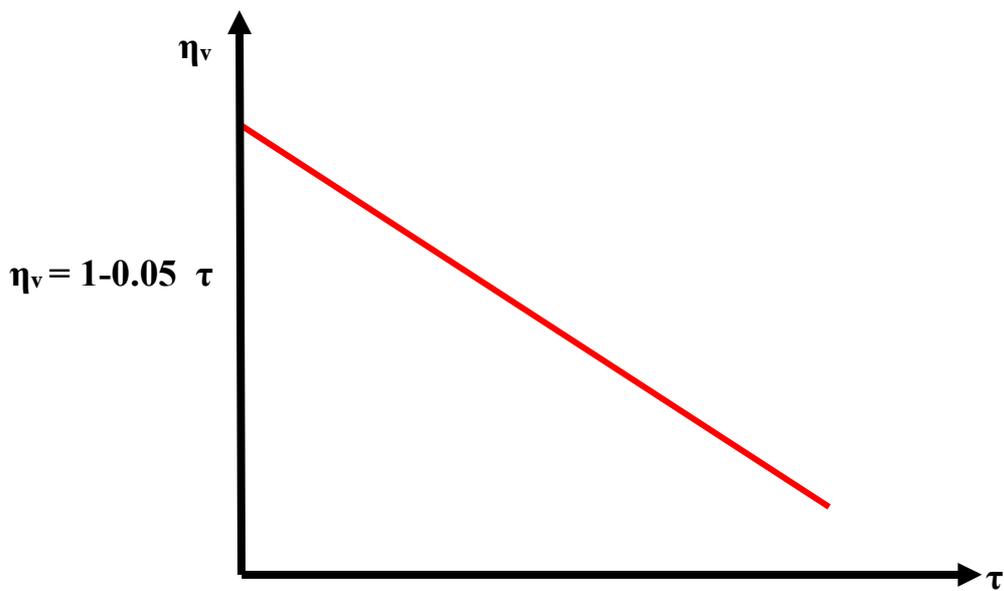


FIGURE IV.2. Variation du rendement volumétrique η_v en fonction du taux de compression τ [5].

b) Puissance effectif absorbé par le compresseur :

$$P_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{th}}}{\eta_{\text{eff}}} \dots \dots \dots \text{(IV.7)}$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.8 - 0.004 (\tau - 5)^2$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.8 - 0.004 (3.143 - 5)^2$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.79$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{672.573}{0.79}$$

$$P_{\text{eff}} = 851.358 \text{ [kW]}$$

P_{eff} : puissance effective ;

P_{th} : Puissance théorique du compresseur ;

Calcul de h₂ : (on assimile le rendement isentropique est égale au rendement indiqué $\eta_i \approx (\eta_s)_c$.

$$(\eta_s)_c = \frac{P_{thcp}}{P_i} = \frac{h_{2th} - h_1}{h_2 - h_1} \dots\dots\dots(IV.8)$$

$$h_2 = \frac{h_{2th} - h_1}{(\eta_s)_c} + h_1$$

$$h_2 = \frac{1607 - 1455.86}{0.84} + 1455.86$$

$$h_2 = 1632 \text{ [kJ/kg].}$$

$$S_2 = 5.734 \text{ [kJ/kg K]}$$

$$T_2 = 81 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{voir annexe})$$

❖ **Puissance cédée au condenseur :**

$$\Phi_k = q_{m(NH_3)} (h_2 - h_3) \dots\dots\dots(IV.8)$$

$$\Phi_k = 4.45 (1632 - 334.93)$$

$$\Phi_k = 5836.81 \text{ [kW].}$$

• **Calcul du coefficient de performance :**

$$COP_{eff} = \frac{\Phi_0}{P_{eff}} = \frac{4987.69}{851.358} \dots\dots\dots(IV.9)$$

$$COP_{eff} = 5.86$$

Figure IV.3. Tracé du cycle du R717 sur le diagramme (T, S).

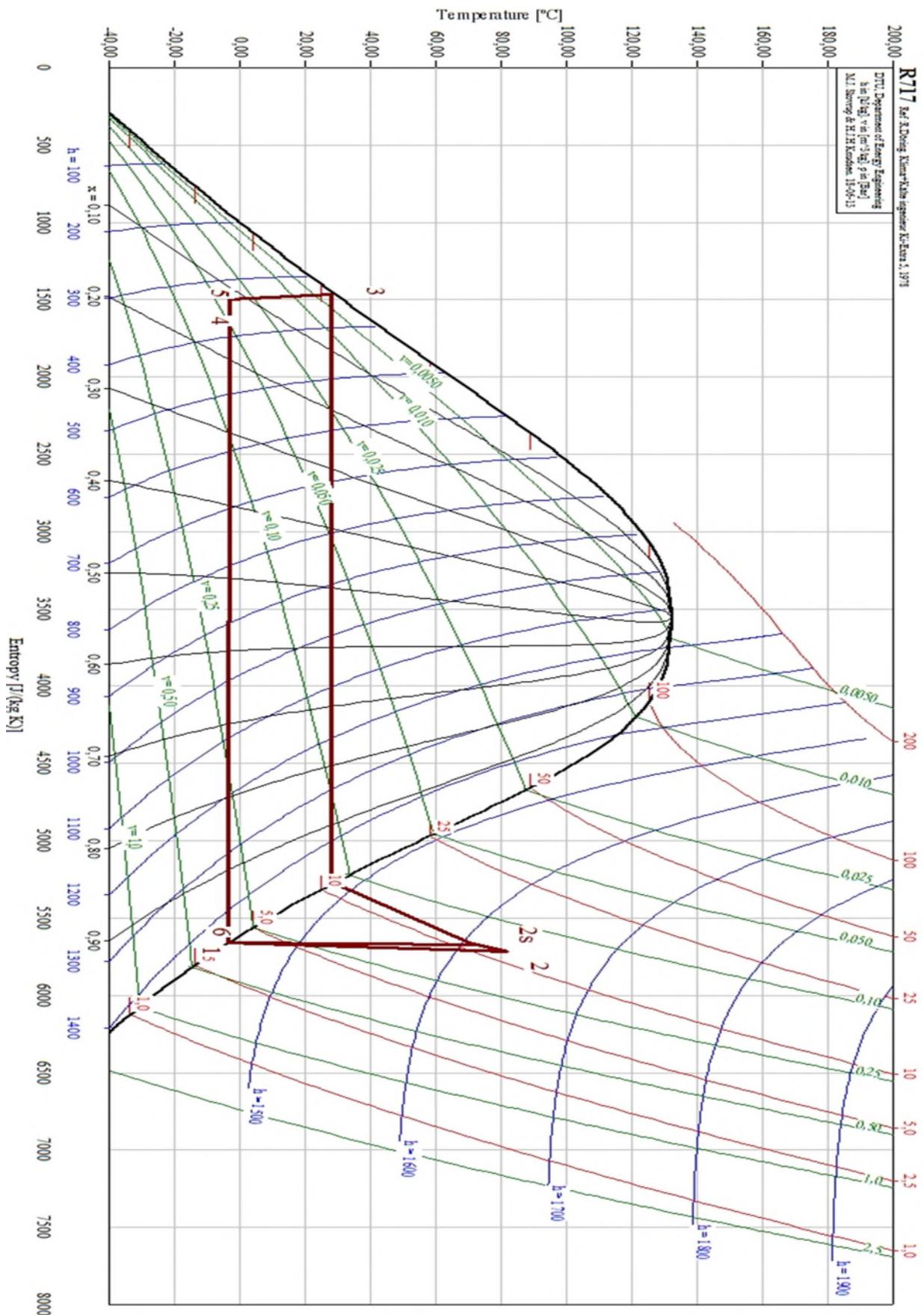
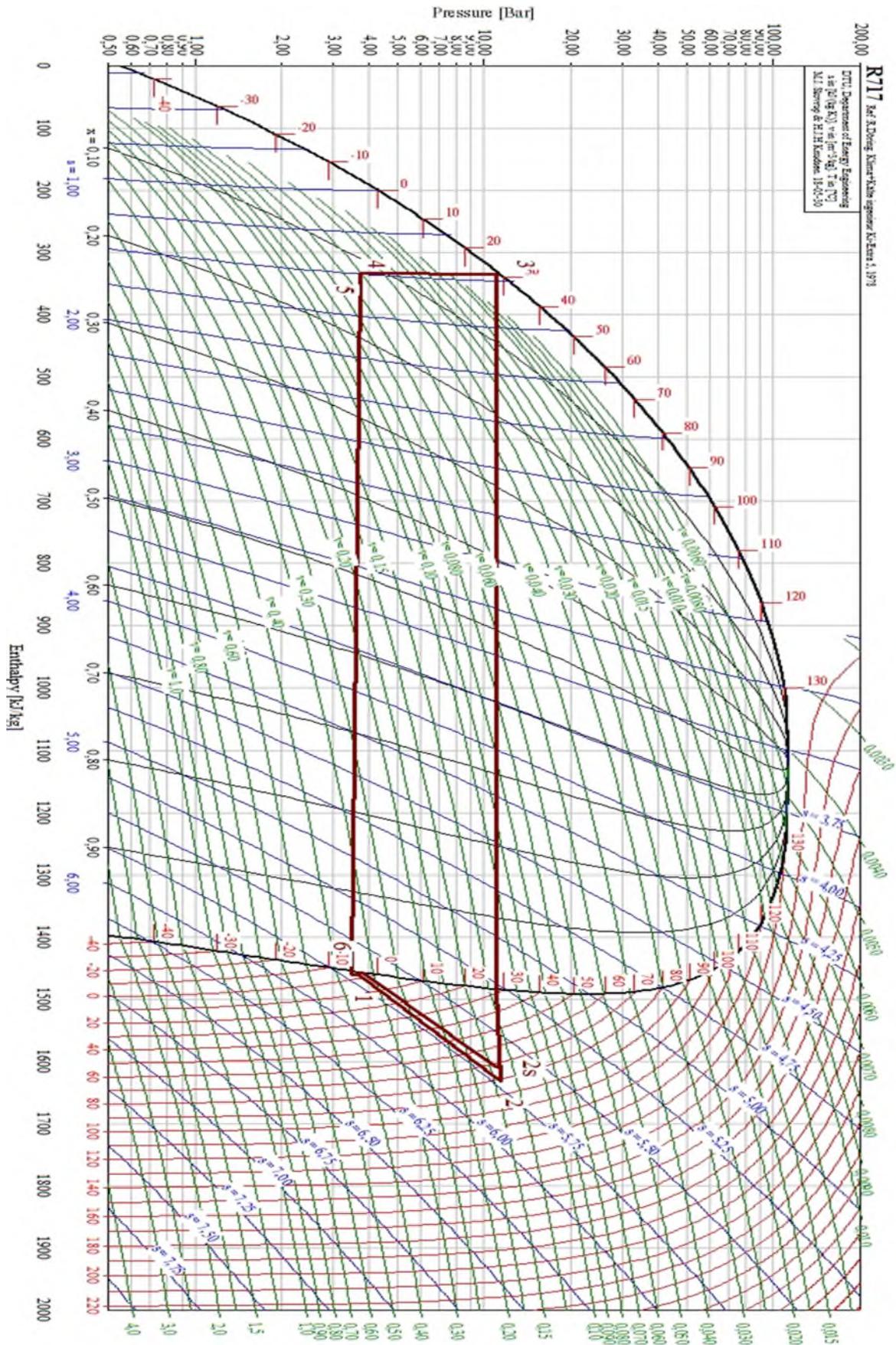


Figure IV.4. Tracé du cycle du R717 sur le diagramme (p, h).



• **Dimensionnements des canalisations :**

1- Canalisation de refoulement :

$$q_{v(NH3)r} = V_{2(NH3)r} \quad q_{m(NH3)r} = S_{(NH3)r} \quad C_{(NH3)r} \dots \dots \dots (IV.10)$$

$$S_{(NH3)r} = \frac{V_{2(NH3)r} \quad q_{m(NH3)r}}{C_{(NH3)r}} = \frac{0.15 \quad 4.45}{20}$$

$$S_{(NH3)r} = 333.75 \text{ cm}^2.$$

$q_{v(NH3)r}$: débit volumique du compresseur au refoulement ;

$V_{2(NH3)r}$: volume massique du R717 au point 2 ;

$S_{(NH3)r}$: section e conduite de refoulement ;

$C_{(NH3)r}$: vitesse des vapeurs adoptée, elle est habituellement comprise entre 6 et 25 m/s.

2-Canalisation d'aspiration:

$$q_{v(NH3)a} = V_{1(NH3)a} \quad q_{m(NH3)a} = S_{(NH3)a} \quad C_{(NH3)a}$$

$$S_{(NH3)a} = \frac{V_{1(NH3)a} \quad q_{m(NH3)a}}{C_{(NH3)a}} = \frac{0.32 \quad 4.45}{20}$$

$$S_{(NH3)a} = 712 \text{ cm}^2.$$

$q_{v(NH3)a}$: débit volumique des vapeurs à l'aspiration du compresseur ;

$V_{1(NH3)a}$: volume massique du R717 au point 1 ;

$S_{(NH3)a}$: section de conduite d'aspiration ;

$C_{(NH3)a}$: vitesse des vapeurs aspirées, elle est de même ordre de grandeur que celle du refoulement, elles sont comprises entre 6 et 25 m/s.

IV.2. Calcul des charges des ateliers :

On sait que :

$$\Phi = q_{m(eg)} C_{(eg)} \Delta t.$$

On obtient ce tableau :

TABLEAU IV.2. Quelques besoins du froid SOUMMAM.

Atelier	Eau glacée			La charge consommée [kW]
	Débit volumique [m ³ /h]	Température de refoulement [°C]	Température de retour [°C]	
Poudrage	55	2	17	959.17
Traitement thermique	38	2	9	309.26
Lait cru	50	2	6	232.053
Fromage	0.216	20	130	27.62
Process (lait UHT01)	55	2	17	955.17
Conditionnement	34	2	6	158.12
Stérilisateur crème	20	2	13	255.78
Pasto lait cru	22	2	25	588.29
Pasto crème	13	2	6	60.45
Réfrigérant pate	70	2	16	1139.38
Fromage fondu	34	2	18	632.47
Total				5317.743

Avec : $\rho_{eg} = 1000$ [kg/m³].

$C_{eg} = 4.1855$ [kJ/kg K].

Remarque :

Que se passe-t-il lorsqu'un système reçoit une charge en plus ? La réponse est simple, la masse de frigorigène doit chercher où se loger, et une redistribution de la charge se produit dans tous les différents composants du système. De toute évidence, les composants avec la plus grande capacité à stocker le fluide frigorigène sous forme liquide et dont le volume interne est plus élevé.

Le premier à offrir cette caractéristique, lorsqu'il est présent, est le réservoir de liquide (BBP). Ce composant est capable de stocker le fluide frigorigène sous forme liquide jusqu'à ce qu'il soit plein.

IV.3. Etude de groupe frigorifique à R134a :

Remplacer le groupe frigorifique à ammoniac avec un groupe au R134a est dans le but de faire une étude thermodynamique comparative entre les deux fluides (R717 et R134a) et d'assurer le même fonctionnement.

a) Régime de fonctionnement :

HP= 7.5 [bar] \longrightarrow $T_k = 29 \text{ }^\circ\text{C}$.

BP= 2.6 bar \longrightarrow $T_1 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$.

b) Caractéristiques thermodynamique aux différents points du cycle :

TABLEAU IV.3. Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle R134a.

Point	P [bar]	T [$^\circ\text{C}$]	h [kJ/kg]	S [kJ/kg K]	Volume massique V [m^3/kg]
1	2.6	-3	395.49	1.7232	0.077
2s	7.5	33.4	416	1.7232	0.027
3	7.5	29	240	1.1379	0.0042
4	2.6	-3	240	1.1479	0.614
5	2.6	-3	240	1.1479	0.614
6	2.6	-3	395.49	1.7232	0.077

➤ Au point 4 on a un titre de vapeur est égal à :

$$X_4 = \frac{h_4 - h_{4\text{liq}}}{h_{4\text{vap}} - h_{4\text{liq}}} \quad \text{Et } X_4 = \frac{S_4 - S_{4\text{liq}}}{S_{4\text{vap}} - S_{4\text{liq}}}$$

$$h_{4\text{liq}} = 196.04 \text{ [kJ/kg]}, \quad h_{4\text{vap}} = 395.46 \text{ [kJ/kg]}$$

$$X_4 = 0.22.$$

$$S_{4\text{liq}} = 0.9855 \text{ [kJ/kg K]}, \quad S_{4\text{vap}} = 1.7237 \text{ [kJ/kg K]}.$$

$$S_4 = 1.1479 \text{ [kJ/kg K]}$$

• **Débit d'ammoniac nécessaire :**

D'après le bilan énergétique d'un échangeur est :

$$q_{m(\text{eg})} C_{\text{eg}} (T_{\text{ref}} - T_{\text{ret}})_{\text{eg}} = q_{m(\text{NH}_3)} (h_6 - h_5).$$

Avec :

$q_{m(\text{NH}_3)}$: débit massique de R134a nécessaire ;

C_{eg} : capacité calorifique de l'eau glacée ;

T_{ref} : température de refoulement d'eau glacée de l'échangeur ;

T_{ret} : température de retour d'eau glacée dans l'échangeur ;

Et de la :

$$q_{m(\text{R134a})} = \frac{\Phi_0}{h_6 - h_5} = \frac{4987.69}{395.46 - 240}$$

$$q_{m(\text{R134a})} = 32.09 \text{ kg/s.}$$

❖ Puissance mécanique du compresseur :

c) Puissance théorique :

$$P_{th} = \dot{m}_{(R134a)} (h_{2th} - h_1)$$

Tel que :

h_1 : l'enthalpie du point 1;

h_{2th} : l'enthalpie théorique du point 2 ;

P_{th} : puissance théorique du compresseur ;

Donc :

$$P_{th} = 32.09 (416 - 395.46)$$

$$P_{2th} = 659.12 \text{ [kW]}.$$

• Taux de compression τ :

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7.5}{2.6}$$

Tel que :

P_2 : La pression de R134a à la sortie des compresseurs.

P_1 : La pression de R134a à l'entrée des compresseurs.

$$\tau = 2.88$$

• Le rendement volumétrique du compresseur :

$$\eta_v = 1 - 0.05 \tau$$

$$\eta_v = 1 - 0.05 \cdot 2.88$$

$$\eta_v = 0.85$$

• Rendement indiqué :

$$\eta_i = \eta_v$$

$$\eta_i = 0.85$$

• Puissance effective :

$$\eta_{\text{eff}} = 0.8 - 0.004 (\tau - 5)^2$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.8 - 0.004 (2.88 - 5)^2$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.782$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{th}}}{\eta_{\text{eff}}}$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{659.12}{0.782}$$

$$P_{\text{eff}} = 842.86 \text{ [kW]}.$$

P_{eff} : Puissance effective du compresseur ;

Calcul de h_2 : (on assimile le rendement isentropique est égale au rendement indiqué $\eta_i \approx (\eta_s)_c$.

$$(\eta_s)_c = \frac{P_{thcp}}{P_i} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$h_2 = \frac{h_2 - h_1}{(\eta_s)_c} + h_1$$

$$h_2 = \frac{416 - 395.46}{0.85} + 395.46$$

$$h_2 = 419.6 \text{ [kJ/kg]}.$$

$$S_2 = 1.731 \text{ [kJ/kg K]}$$

$$T_2 = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_2 = 0.02794 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{voir annexe})$$

❖ **Puissance cédée au condenseur :**

$$\Phi_k = q_{m(R134a)} (h_2 - h_3)$$

$$\Phi_k = 32.09 (419.6 - 240)$$

$$\Phi_k = 5763.36 \text{ [kw]}.$$

• **Calcul du coefficient de performance :**

$$\text{COP}_{\text{eff}} = \frac{\Phi_0}{P_{\text{eff}}} = \frac{4987.69}{842.86}$$

$$\text{COP}_{\text{eff}} = 5.91.$$

Figure.IV.5. Tracé du cycle du R134a sur le diagramme (P, h).

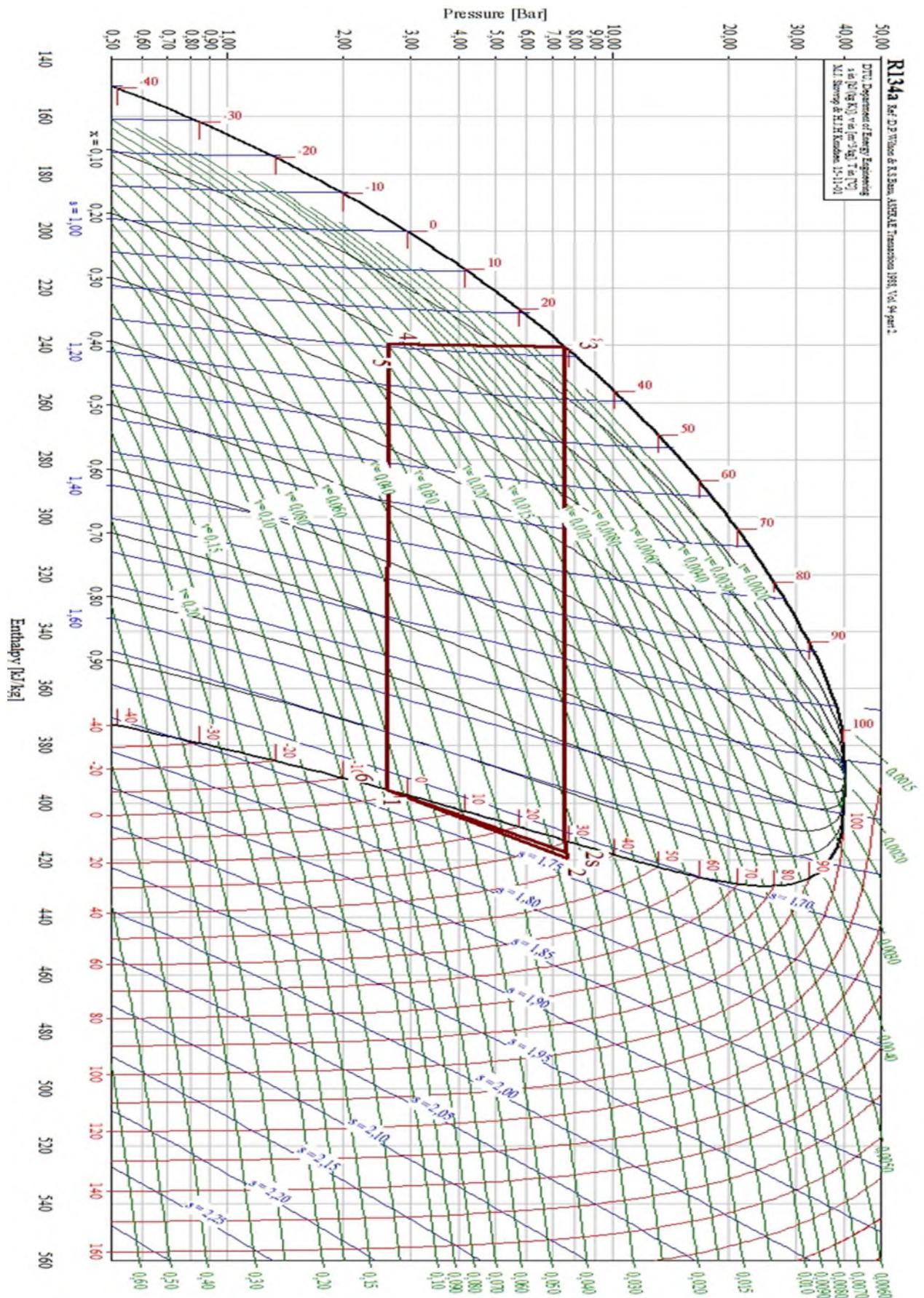
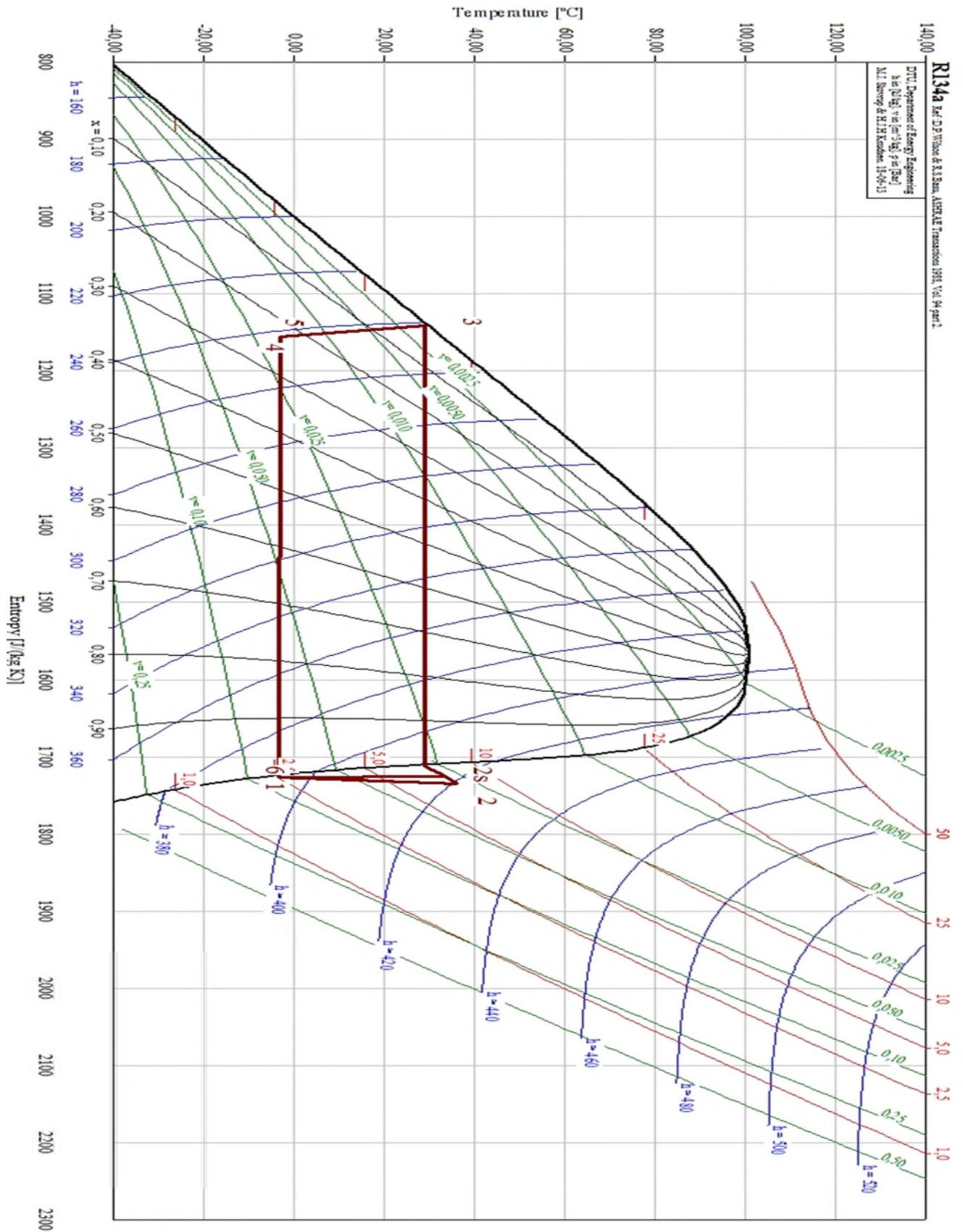


Figure IV.6. Tracé du cycle du R134a sur le diagramme (T, S).



• Dimensionnements des canalisations :

1) Canalisation de refoulement :

$$q_{v(R134a)r} = V_{2(R134a)r} \cdot \rho_{m(R134a)r} = S_{(R134a)r} \cdot C_{(R134a)r}$$

$$S_{(R134a)r} = \frac{V_{2(R134a)r} \cdot \rho_{m(R134a)r}}{C_{(R134a)r}} = \frac{0.02794 \cdot 32.08}{20}$$

$$S_{(R134a)r} = 448.16 \text{ cm}^2.$$

$q_{v(R134a)r}$: débit volumique du compresseur au refoulement ;

$V_{2(R134a)r}$: volume massique du R134a au point 2 ;

$S_{(R134a)r}$: section e conduite de refoulement ;

$C_{(R134a)r}$: vitesse des vapeurs adoptée, elle est habituellement comprise entre 6 et 25 m/s.

2) Canalisation d'aspiration :

$$q_{v(R134a)a} = V_{1(R134a)a} \cdot \rho_{m(R134a)a} = S_{(R134a)a} \cdot C_{(R134a)a}$$

$$S_{(R134a)a} = \frac{V_{1(R134a)a} \cdot \rho_{m(R134a)a}}{C_{(R134a)a}} = \frac{0.077 \cdot 32.08}{20}$$

$$S_{(R134a)a} = 1235.08 \text{ cm}^2.$$

$q_{v(R134a)a}$: débit volumique des vapeurs à l'aspiration du compresseur ;

$V_{1(R134a)a}$: volume massique du R134a au point 1 ;

$S_{(R134a)a}$: section de conduite d'aspiration ;

$C_{(R134a)a}$: vitesse des vapeurs aspirées, elle est de même ordre de grandeur que celle du refoulement, elles sont comprises entre 6 et 25 m/s

IV.4. Comparaison entre R717 et R134a :

La comparaison se fera sur la base des performances thermodynamique calculées et des critères de choix des fluides établies dans le III chapitre.

TABLEAU IV.4. Paramètre de comparaison entre R717 et R134a

Propriété et performance	R717	R134a
Température critique (°C)	132.35	101
Température d'ébullition (°C)	-33.5	-26.4
Température de refoulement (°C)	81	35.5
Taux de compression τ	3.143	2.88
Groupe de sécurité	B ₂	A ₁
Débit massique (kg/s)	4.45	32.08
Section d'aspiration (cm ²)	712	1235.08
Section de refoulement (cm ²)	333.75	448.16
Nécessité de frigoporteur	Obligatoire	Pas nécessaire (Détente directe)
ODP	0	0
GWP	0	1300
COP	5.86	5.91

D'après le tableau IV.4 on peut dire que l'ammoniac plus intéressant que le R134a malgré sa toxicité, l'avantage d'ammoniac se résume en :

- Commençons par la température critique du R134a qui est inférieure à celle de l'ammoniac, et la température d'ébullition de ce dernier est loin de sa température critique par rapport au R134a, ces critères permet à l'installation du R717 de travailler plus efficacement.
- L'installation à ammoniac à besoin d'un débit frigorigène très inférieur à celui du R134a, sachant que le prix du R134a plus chère que le R717.
Le prix de lubrifiant associé aux frigorigènes est aussi considérer ainsi les huiles, imposées pour les frigorigènes HFC et leur mélange, sont beaucoup plus chers que les huiles minérales acceptables avec les anciens frigorigènes comme l'ammoniac. [5]
- On voit bien que les sections des canalisations de l'ammoniac est largement inférieur à celles du R134a, cela est un avantage économique.
- Le COP n'est pas un critère de comparaison car il dépend des conditions d'évolution de chaque fluide.

Comme l'ammoniac à des avantages et aussi le R134a à quelques avantages qui se résume en :

- La température de refoulement du R134a est inférieure à celle de l'ammoniac, cela nous permet d'utiliser un petit système de refroidissement.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un frigoporteur pour le R134a car il n'est pas toxique, mais d'un côté on peut considérer ça comme un inconvénient, car le frigoporteur peut être utile pour d'autre application.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, on conclut que l'ammoniac est plus intéressant que le R134a, cela au point de vue économique et énergétique, ce qui est le plus important.

L'ammoniac est le mieux placé par sa neutralité vis-à-vis de la couche d'ozone, et sa non-participation au réchauffement de la planète (GWP nul), contrairement au R134a qui malgré qu'il n'a aucun effet sur la couche d'ozone mais sa participation à l'intensification de l'effet de serre l'oblige à quitter le domaine industrielle (production du froid).

Toutes ces points qui laissent l'ammoniac un bon fluide frigorigène malgré sa toxicité.

Conclusion Générale

Au cours de notre stage au sein de l'entreprise SARL SOUMMAM, nous nous sommes intéressés au groupe frigorifique à ammoniac alimentant en partie le complexe en froid.

Dans un premier temps une évaluation des performances énergétiques de ce groupe a été effectuée. Il s'en est suivi une étude de ce groupe avec un autre fluide frigorigène à savoir le R134a.

A l'issue de cette deuxième étude une analyse comparative a été dressée. En complément à ces aspects thermodynamique une étude relativement bien détaillée sur les fluides frigorigènes (avantages et inconvénient) a été menée.

En fin nous espérons que ce modeste travail puisse d'abord être utile à l'entreprise Soummam qui nous a bien accueillis et aussi aux futures promotions à venir.

Bibliographie

- [1] : Lucien Borel «thermodynamique et énergétique » ; Presses polytechnique Romande ; 1984.
- [2] : Olivier PERROT «Cours de machine frigorifique » ; I.U.T de Saint-Omer Dunkerque ; 2010 ; 2011.
- [3] : Francis MEUNIER, Paul RIVET ; Marie-France ; TERRIER «Froid industriel » ; 2005.
- [4] : Génie Frigorifique ; «Principe de la production du froid » ; gumtn Humberg ; www.gunt.de.
- [5] : Maxime DUMINIL ; «Cours de production du froid » ; E.C.Paris.
- [6] : Yvan FAYOLLE ;STE Clauger ; «Les Fluides frigorigènes » ;support N^o 2 de février 2002.
- [7] : PDF Thechnique du froid ; Cours de base ; «CFmmLog », Edition juillet 2007 ; www.thechniquedufroid.com.
- [8] : Aide-mémoire AFPA AICVF ; 12/06/2017 ; «170612-RT-Pereso_Fluides-frigo-AFPA-Metzf ».
- [9] : Rodolphe LEBERTON ; «Risque chimique» ; ED 969.
- [10] : Pdf fiche-ammoniac-INRS-4 ; Bases de données- Fiches TOXICOLOGIQUES ; sur le site web de l'INRS ; www.inrs.fr .
- [11] : Site web www.mdf.afpa.free.fr ; «Les condenseurs» .
- [12] : Aide-mémoire « Froid industriel » ;2^{eme} édition ; « DUNOD ».
- [13] : Fluides frigorigènes ; RPF « Marque d'information » ; DUNOD 2014 ; sur le site web www.dunod.com .
- [14] : Electrotechnique ; « le froid électrique » ; EDUCALEVRE.
- [15] : Les fluides frigorigènes ; «Impact environnement » ; www.energieplus-lesite.be/energieplus/pag-11629.htm .
- [16] : Fiche de données de sécurité R134a ; FDS N^o : 178 IGE Edition 4.
- [17] : Dossier climatisation-version 001-2013 sur le site web www.leguideits.fr.

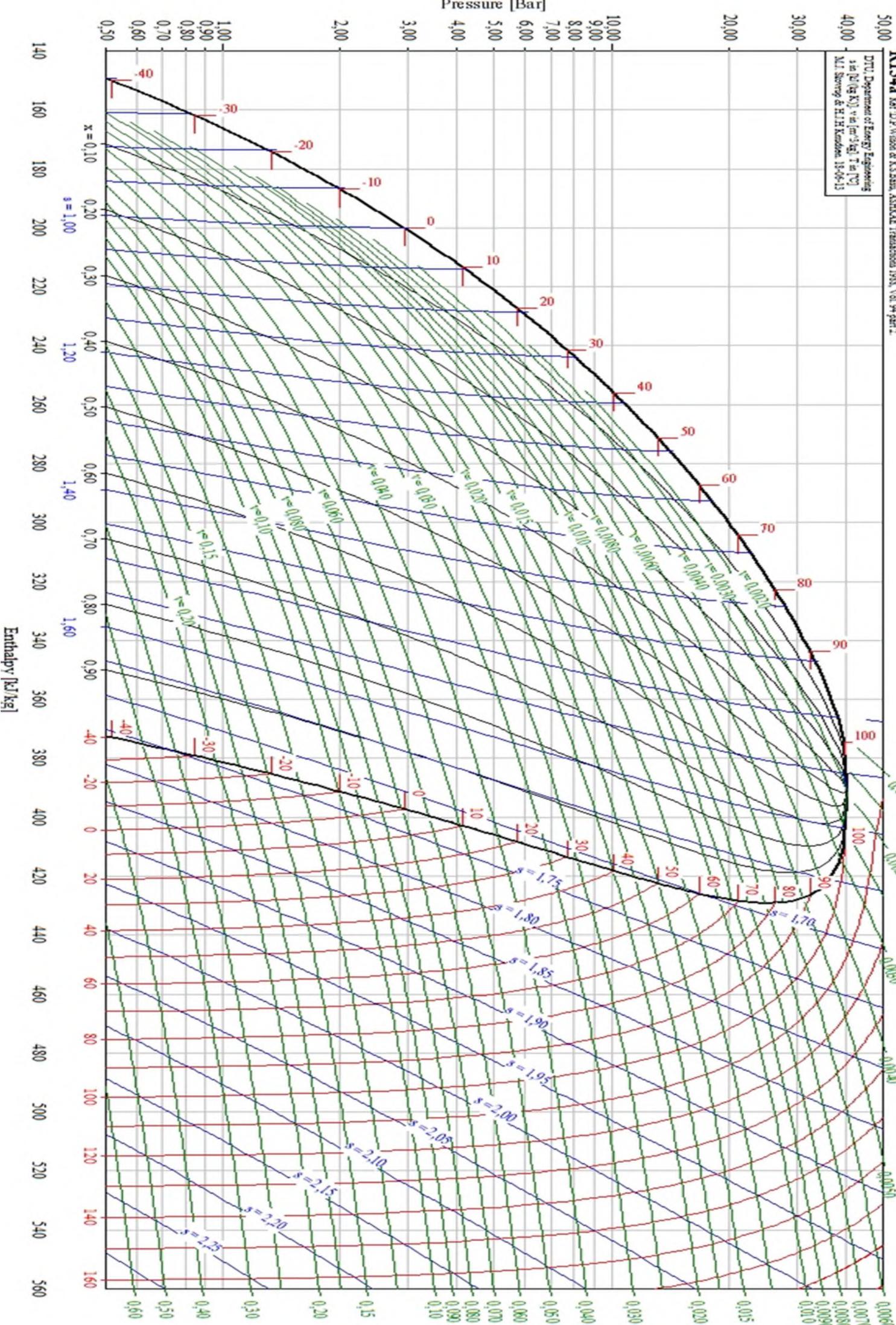
Bibliographie

[18] : L.CUVELIER-Comprimer l'air « les compresseurs » ; source « le guide des automatismes » ; sur le site web www.cuvelier-ludovic.fr .

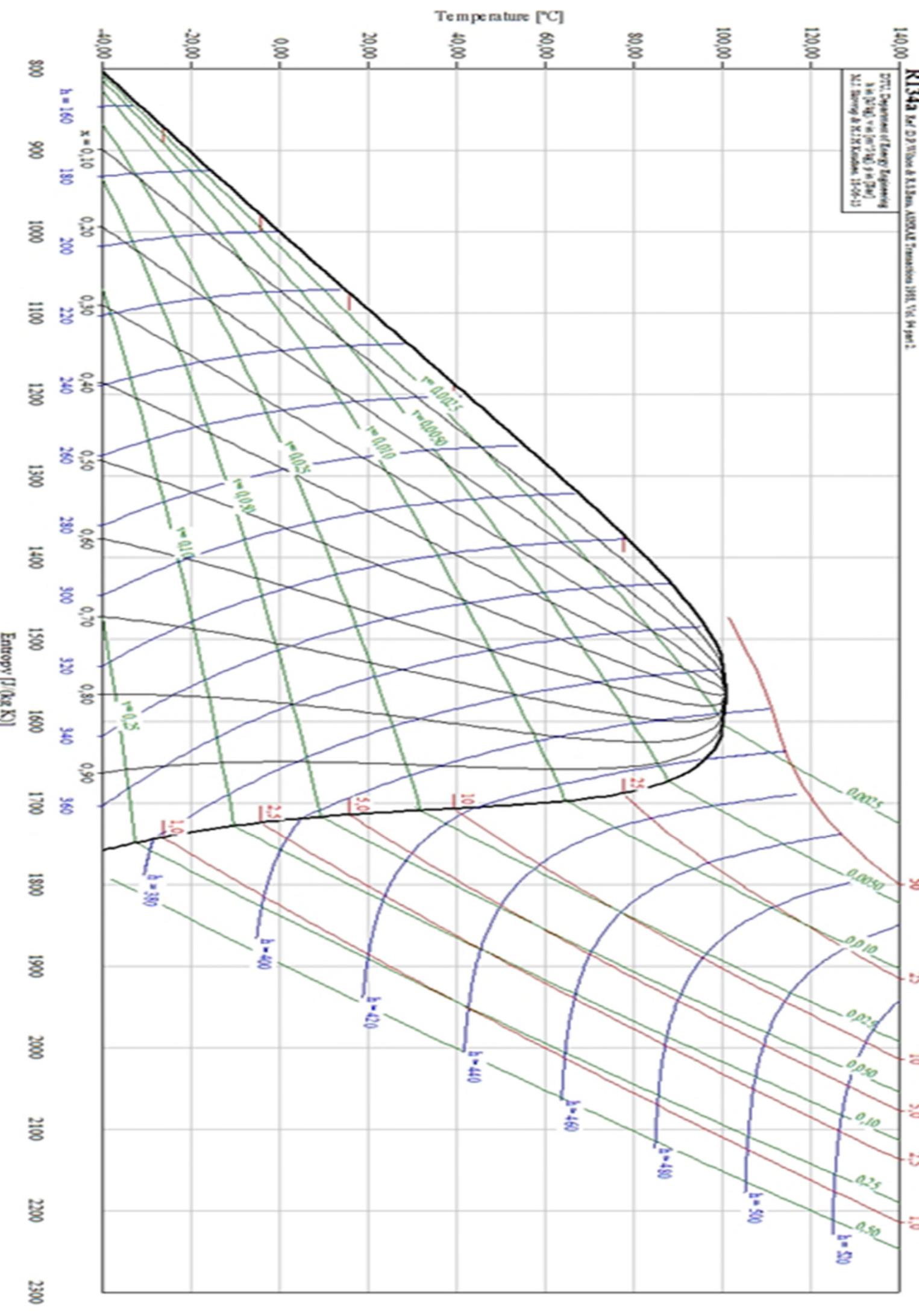
[19] : Dossier climatisation ; « Les condenseurs à air » ; version 001-2014 sur le site web www.leguideits.fr .

[20] : Documentation SARL SOUMMAM Algérie.

DTU, Department of Energy Engineering
s in [K] v in [m³/kg] T in [°C]
M.I. Stewart & H.H. Kenyon, 18-06-13



DTU, Department of Energy Engineering
 1. h in [°C], v in [m³/kg], p in [bar]
 2.1. Density & 2.1.2. Kinematic: 18-09-13



DTU, Department of Energy Engineering
s in [N/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.I. Stenberg & H.H. Knudsen, 1946-13

