

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 :

KARIM MAZROU

LAIB MOHAND

Thème

Dimensionnement d'un groupe frigorifique
Pour stockage du sucre liquide

Soutenu le 28/06/2018 devant le jury composé de:

Mr : A. BENSLIMANE

Président

Mr : A. DJERRADA

Rapporteur

Mr : N. BOUTALBI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

*En premier lieu, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé
pour arriver à terme de ce travail.*

Je tiens à remercier toute ma famille.

*Je tiens à remercier vivement mon Promoteur Mr
DJERRADA.A pour sa disponibilité et son aide tout au long de
ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement mon Encadreur Mr
KAMEL MEBROK, Pour sa disponibilité et son orientation
tout au long de ce travail.*

*Je tiens également à remercier tous les enseignants
Du département génie mécanique.*

*Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à toutes
Les personnes qui m'on aidés dans l'accomplissement de ce
Projet.*

*Que Monsieur le Président et Messieurs les membres du jury
Trouvent ici l'expression de ma gratitude pour avoir acceptés
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 et ma sœur qui m'ont toujours aidé, Abdouhab, Katia, Hakima, Amina.

*A NINOUCHE qui a toujours été là à mes côtés, m'a
Enormément soutenu et encouragé.*

A Nabil, ainsi qu'à leurs pères et mères.

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

KARIM

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 et ma sœur qui m'ont toujours aidé, Abdelghani, Lounas, Messaouda, Khalef.

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

A Nabil, ainsi qu'à leurs pères et mères.

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

Mohand

Nomenclature C_{PEG}

C_p :	Chaleur massique à pression constante	(J/kg °C)
D :	Diamètre	(m)
h :	Enthalpie massique	(kJ/kg)
C_{PEG} :	Capacité calorifique de l'eau	(kJ/kg °C)
p :	Pression	(bar)
P :	Puissance	(W)
qm :	Débit massique	(kg/s)
qv :	Débit volumique	(m ³ /s)
τ :	Taux de compression	(sans unité)
s :	Entropie	(J/kg K)
S :	Surface	(m ²)
t :	Temps	(S)
T :	Température	(K)
v :	Volume massique	(m ³ /kg)
V :	Volume	(m ³)
COP :	Coefficient de performance	
Φ_k :	Puissance rejetée au condenseur	(kW)
P_{eff} :	Puissance effective absorbée par le compresseur	(kW)
P_{thcp} :	Puissance théorique du compresseur	(kW)
S_R :	Section de conduit de refoulement	(m ²)
W_R :	vitesse des vapeurs refoulées	(m/s)
W_R :	vitesse des vapeurs aspirées	(m/s)
W_L :	vitesse du frigorigène liquide	(m/s)

Symboles grecs

$(\eta_s)_c$:	Rendement isentropique de la compression (sans unité)
ε :	Coefficient de performance (sans unité)
η_{eff} :	Rendement effectif (sans unité)
η_i :	Rendement indiqué (sans unité)
η_m :	Rendement mécanique (sans unité)
η_v :	Rendement volumétrique (sans unité)

θ : Température (°C)
 ρ : Masse volumique (kg/m³)
 Φ : Puissance thermique (W)

Indices principaux

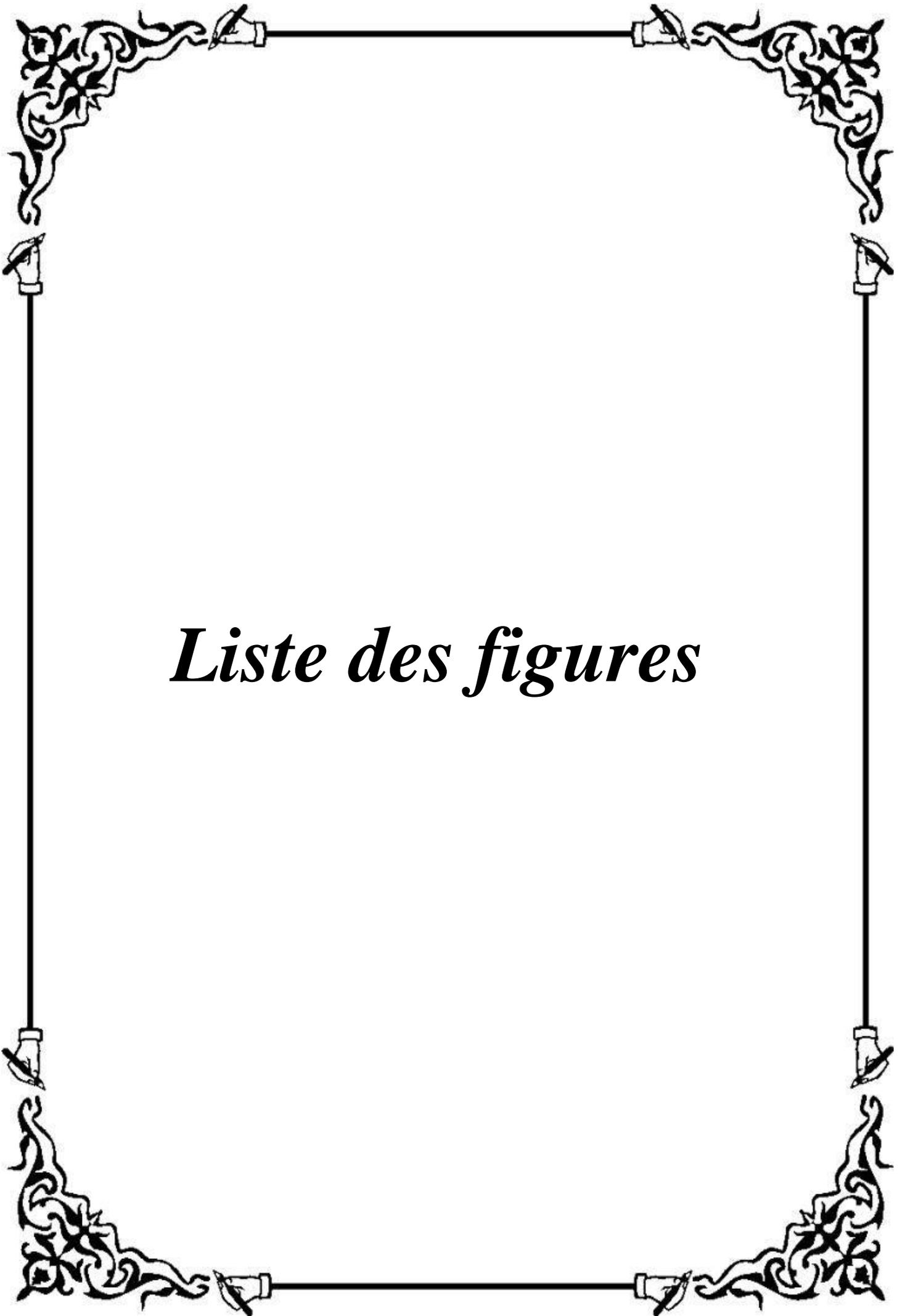
0 : Evaporation
eff : Effectif (ve)
FF : Fluide frigorigène
k : Condensation
m : Moyen
r : Réel
ref : Refoulement
th : Théorique



*Liste des
Tableaux*

Liste des tableaux

Tableau.III.1: exprime la constitution et les renseignements sur quelques fluides	31
Tableau.III.2 : Groupe de sécurité pour les fluides frigorigènes	34
Tableau.III.3 : Formule chimique de différents fluides frigorigènes	35
Tableau.III.4 : Impacte des différents frigorigènes sur l'environnement	37
Tableau.III.5 : Propriétés thermodynamique du R134a	39
Tableau IV.1 : coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle du R-134a	41
Tableau IV.2 : Propriétés thermodynamique du R717	46
Tableau IV.3 : coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R717	47
Tableau IV.4 : Paramètres de fonctionnement de l'échangeur	55

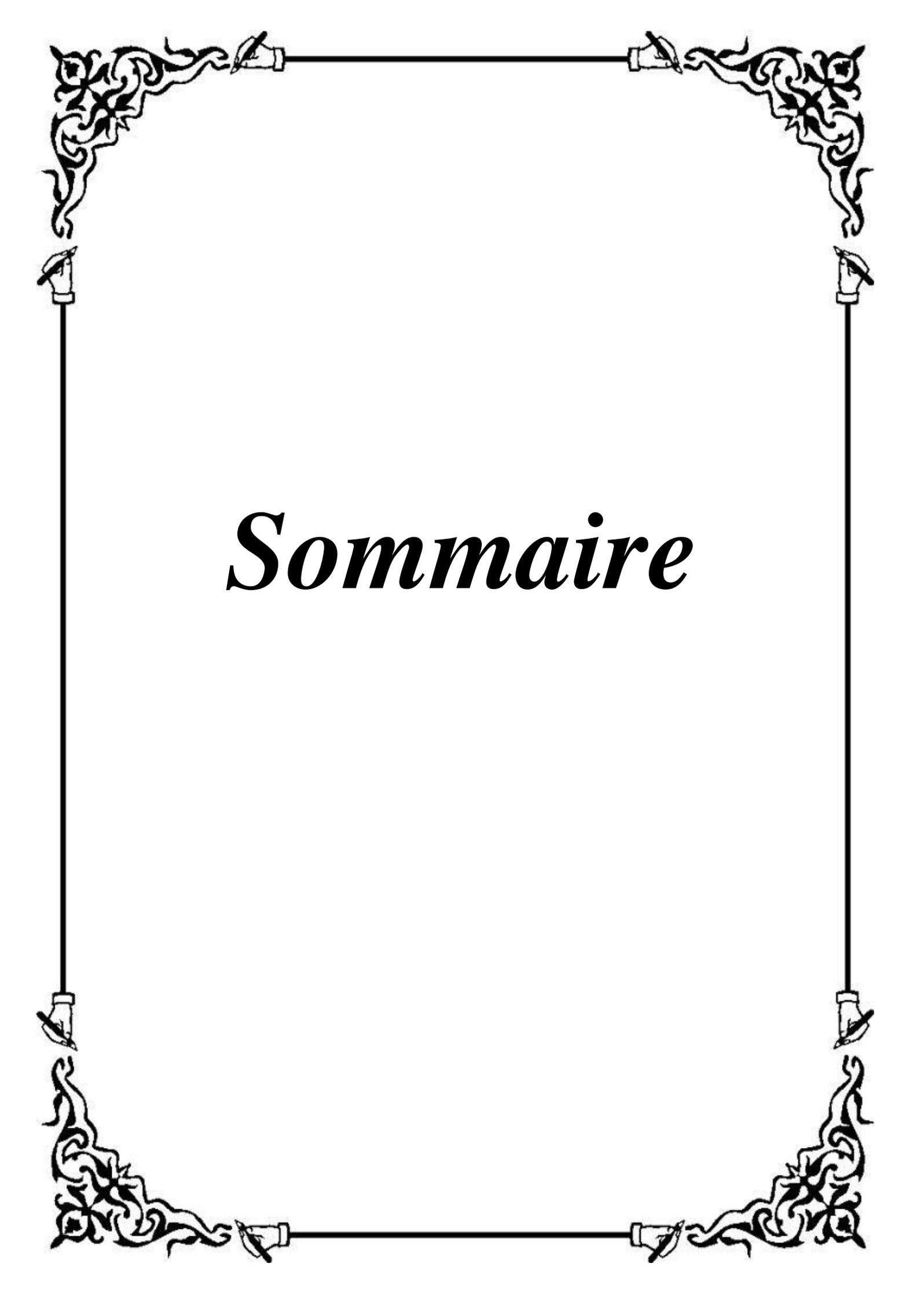


Liste des figures

Liste des figures

Figure. I.1 Process du sucre liquide	8
Figure.II.1 : conservation des produits médicaux	10
Figure.II.2 : conservation des aliments	10
Figure.II.3 : conservation des produits chimiques	11
Figure.II.4 : Schéma de base d'une machine frigorifique	13
Figure.II.5 : Machine frigorifique à compression	13
Figure.II.6 : Machine frigorifique à éjection	14
Figure.II.7 : Machine frigorifique à adsorption	14
Figure.II.8 : Machine frigorifique à absorption	15
Figure.II.9 : Schéma de la machine frigorifique de base	16
Figure.II.10 : Exemple d'un diagramme enthalpique (R134a)	18
Figure.II.11 : Illustration du Compresseur	20
Figure.II.12 : Principe de la compression à vis	21
Figure.II.13 : compresseurs centrifuges	22
Figure.II.14 : Illustrations du Détendeur	25
Figure.II.15 : Schéma d'un échangeur de chaleur à plaque	26
Figure.II.16 : Variation du rendement volumétrique η_v en fonction du taux de compression $r = \frac{HP}{BP}$	27
Figure.IV.1 : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple	40
Figure.IV.2 : Tracé du cycle du R-134a sur le diagramme $\ln(P) - h$	53
Figure.IV.3 : Tracé du cycle du R-134a sur le diagramme $T - S$	53
Figure.IV.4 : Tracé du cycle du R717 sur le diagramme $\ln(P) - h$	54
Figure.IV.5 : Tracé du cycle du R717 sur le diagramme $T - S$	54
Figure.IV.6 : Evolution de température dans un échangeur à contre-courant	55

Liste des figures



Sommaire

Introduction1

Chapitre I

I. Présentation générale de l'entreprise2

I.1. Historique 2

I.2. Missions et objectifs 2

I.3. Activités de cevital 3

I.4. Situation géographique 3

I.5. Les different produits du groupe cevital<<complexe agroalimentaire de bejaia 3

I.6. Description du procédé industriel4

I.6.a. Le sucre dans le monde4

I.6.b.composition et structure du sucre4

I.7. Procédés de raffinage de sucre liquide4

I.7.a. Section 1 : Affinage et refonte4

I.7.b. Section 2 : Carbonatation et filtration4

I.7.c. Section 3 : Décolonisation5

I.7.c.1. Etapes de la fabrication du sucre liquide5

I.7.d. Section 4 : Concentration6

I.7.e. Section 5 : Stockage expédition7

I.8. Principaux bénéfices obtenus par l'utilisation des sucres. liquides7

Chapitre II

I. Généralités sur le froid10

II.1. La production du froid.10

II.2. Domaine d'utilisation du froid10

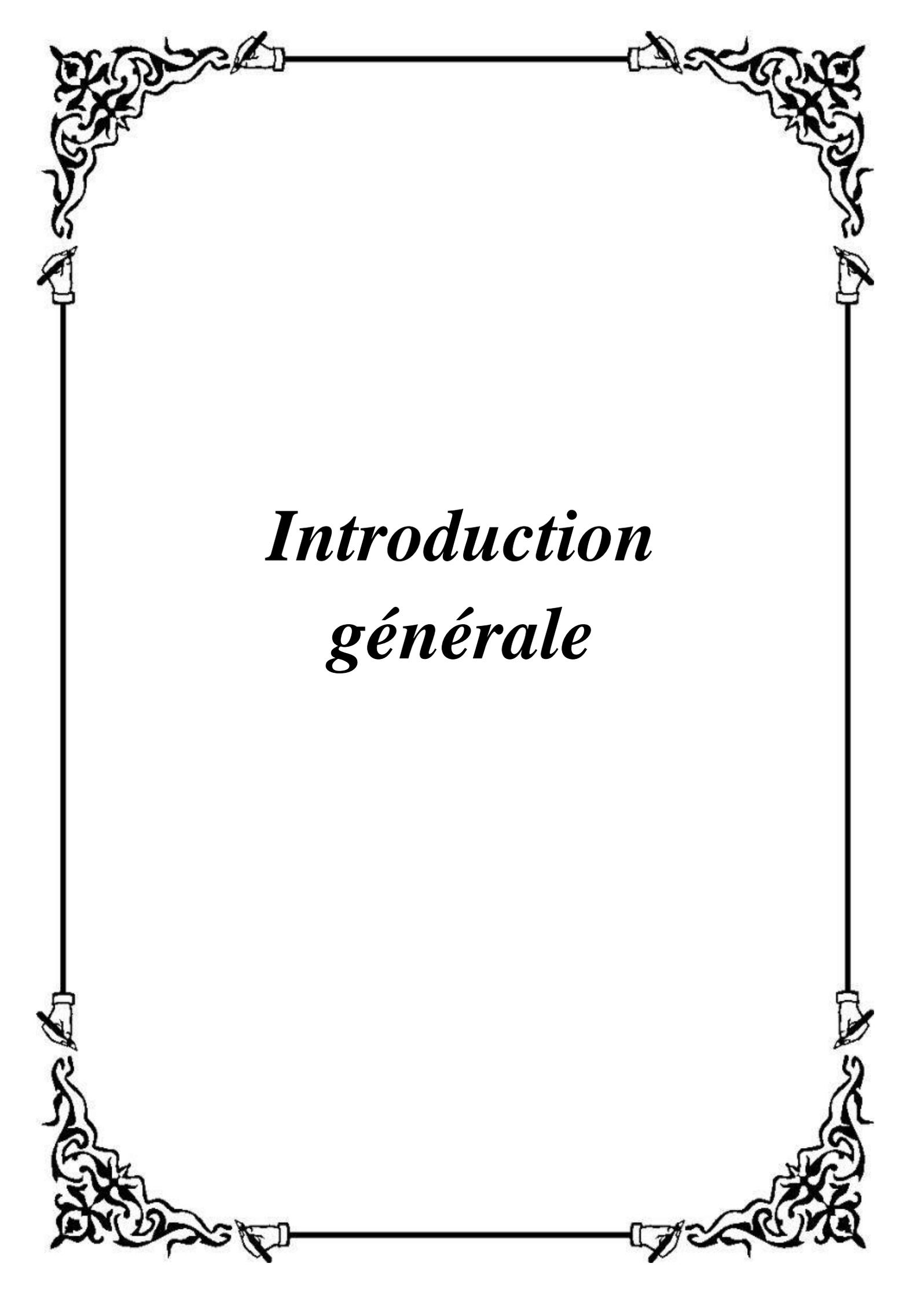
II.3. Différents principes de production du froid	11
III. Définition d'une machine frigorifique	12
III.1. Différents types des machines frigorifiques.....	13
III.2. Le cycle frigorifique	15
III.2.a. Diagrammes thermodynamiqu.....	17
III.2.b. Les différents diagrammes	17
III.3. Coefficient de performance (COP) ou (ϵ_f)	19
III.4. Compresseur	20
III.4.1. Les types de compresseurs	20
III.4.1.a. Les Compresseurs volumétriques	20
III.4.1.b. Compresseurs centrifuges	21
III.5. Condenseurs	22
III.5.1. Condenseur à air	22
III.5.2. Condenseur à eau	22
III.5.3. Condenseurs évaporatifs ou évapore-condenseurs	23
III.6. Evaporateur	23
III.6.a. Evaporateurs refroidisseurs d'air	23
III.6.b. Evaporateurs à circulation d'air naturelle	23
III.6.c. Evaporateurs ventilés	24
III.6.d. Evaporateurs refroidisseurs du liquide	24
III.6.e. Evaporateur immergés	24
III.6.f. Evaporateur multitubulaires noyés	24
III.6.g. Evaporateur a détente directe	24
III.6.h. Evaporateur à plaques	24
III.7. Détendeur	24
III.7.1. Type de détendeur	25
III.8. Echangeur	25
III.8.1 Echanger à tube et calandre	25
III.8.2 Échangeur de chaleur à plaques	26
III.8.3 Echanger à courants croisés	26
IV. Calculs des différentes performances frigorifiques	27

Chapitre III

III. Le Fluide frigorigène	29
III.1. Leurs propriétés	29
III.1.a. Propriétés physiques	29
III.1.b. Propriétés chimiques	30
III.1.c. Propriétés physiologiques	30
III.2. Classification des fluides frigorigène	30
III.2.a. les composés inorganiques	30
III.2.b. les composés organiques	30
1) Les corps purs	31
2) Les mélanges	32
3) Les hydrocarbures	32
III.3. Critères et choix des fluides	33
III.3.a. Critères thermodynamiques	33
III.3.b. Critères économiques	33
III.3.c. Critères de sécurité	33
III.3.d. Critères physiques	34
III.3.e. Critères technique	35
III.4. Formule chimique de différents fluides frigorigènes	35
III.5. Le choix d'un fluide frigorigène	35
III.6. Les caractéristiques physiques du fluide frigorigène parfait	36
III.7. Les fluides frigorigènes et l'environnement	36
III.7.a. L'effet de serre	36
III.7.b. La couche d'ozone	37
III.8. Fluide frigorigène R134a	38
III.8.a. Propriétés thermodynamique du R134a	38

Chapitre V

IV.1. Analyse thermodynamique	40
IV.2. Etude de l'installation existante	40
IV.2.1. Etude avec R-134a	41
IV.2.2 Calcul des performances thermodynamiques	42
IV.2.3. Dimensionnement des canalisations	44
IV.3. Etude de l'installation avec ammoniac	46
IV.3.1 Calcul des performances thermodynamiques	47
IV.3.2 Dimensionnement des canalisations	50
IV.4 : Caractéristique de l'échangeur eau glacée / Sucre liquide	55
Conclusion générale	58
Bibliographie	
Annexes	

A decorative rectangular border surrounds the text. It features four ornate floral corner pieces and four quill pen motifs, one on each side of the border.

Introduction
générale

Le froid industriel à d'innombrables applications parmi lesquelles nous pouvons citer le secteur agro-alimentaire, la médecine, le confort humain et le secteur industriel en général.

Le présent travail s'inscrit dans le domaine de l'agro-alimentaire et plus précisément dans le stockage du sucre liquide, étape fondamentale dans le processus de production de sucre à *Cevital*.

Il existe plusieurs procédés de production de froid le plus répandu, objet de la présente étude et la production de froid par une machine à compression mécanique de vapeur de fluide frigorigène.

Le présent travail est consigné dans un mémoire à quatre chapitres dont :

-le premier chapitre est destiné à la description du processus de production du sucre, avec une présentation de l'entreprise *Cevital*.

-le deuxième chapitre est dédié à la production de froid et aux machines frigorifiques.

-le troisième chapitre a été consacré aux fluides frigorigènes, leur nature, leur toxicité, leurs avantages et leurs inconvénients ont été largement relatés.

-le quatrième chapitre est destiné aux différents calculs thermodynamiques et aux performances de ces machines. Une étude du groupe avec le fluide frigorigère R134a a été menée. Une comparaison avec le fonctionnement à ammoniac a été menée.

Nous terminons le chapitre IV en retrouvant et en mentionnant les caractéristiques de l'échangeur à plaques eau glacée / sucre liquide.

-Enfin le mémoire s'achève avec une conclusion générale.

A decorative rectangular border surrounds the page. It features four ornate floral corner pieces and four quill pen motifs, one on each side of the border.

Chapitre I

I. Présentation générale de l'entreprise

I.1. Historique

CEVITAL est parmi les entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché. Elle a été créée par des fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe dans le port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 45000 m². *Cevital* contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale, elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant un large gramme de produits de qualité.

Les nouvelles données économiques nationales dans le marché de l'agroalimentaire, font que les meilleurs sont ceux qui maîtrisent d'une façon efficace et optimale les coûts, les charges et ceux qui offrent le meilleur rapport qualité/prix. Ceci est nécessaire pour s'imposer sur le marché que *cevital* négocie avec les grandes sociétés commerciales internationales, ces produits se vendent dans différentes villes africaines (Lagos, Niamey, Tunis, Tripoli...).

I.2. Missions et objectifs

L'entreprise a pour mission principale de développer la production et d'assurer la qualité et le conditionnement des huiles, des margarines et du sucre à des prix nettement plus compétitifs et cela dans le but de satisfaire le client et le fidéliser.

Les objectifs visés par *cevital* peuvent se présenter comme suit :

- L'extension de ses produits sur tout le territoire nationale.
- L'importation de graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes.
- L'optimisation de ses offres d'emploi sur le marché du travail.
- L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses.
- La modernisation de ses installations en termes de machine et technique pour augmenter le volume de sa production.
- Le positionnement de ses produits sur le marché étranger par leurs exportations.

I.3. Activités de cevital :

Lancé en Mai 1998, le complexe *cevital* a débuté son activité par le conditionnement d'huile en décembre 1998. En février 1999, les travaux de génie civil de la raffinerie ont débuté, cette dernière est devenue fonctionnelle en aout 1999. L'ensemble des activités de *cevital* est concentré sur la production et la commercialisation des huiles végétales, de margarine et de sucre et se présente comme suit :

- Raffinage des huiles (1800 tonnes/jour) ;
- Conditionnement d'huile (1400 tonnes/jour) ;
- Production de margarine (600 tonnes/jour) ;
- Fabrication d'emballage (PET) : Poly-Ethylène-Téréphtalate (9600unitès/heure) ;
- Raffinage du sucre (1600 tonnes/jour) ;
- Stockage de céréales (120000 tonnes) ;
- Minoterie et savonnerie en cours d'étude.

I.4. Situation géographique :

Cevital est implanté au niveau du nouveau quai du port de Bejaia à 3 km du sud-ouest de cette ville, a proximité de la RN 12. Cette situation géographique de l'entreprise lui a beaucoup profité étant donné qu'elle lui confère l'avantage de proximité économique. En effet elle se trouve proche du port et l'aéroport, et il s'étend sur une superficie de 14 Hectares.

I.5. Les différents produits du groupe cevital << complexe agroalimentaire de Bejaia >> : Les produits de *cevital* disponible sur le marché sont :

- **Huile :**
 - Fleuri al : 100% tournesol commercialisé depuis aout 1999.
 - Soya : 100% soya commercialisé depuis décembre 1999.
 - Olivia : huile d'Alène rétines.
 - Fridor : huile végétal 100% équilibrée.
- **Margarine :**
 - Fleurial.
 - Mâtina.
 - La parisienne.

- Schourteningue.

➤ **Sucre :**

- Sucre blond cristallin.
- Sucre liquide.

I.6. Description du procédé industriel

I.6.a. Le sucre dans le monde :

Au cours des 20 dernières années la consommation mondiale du sucre, s'est développée en volume dans les pays en voie de développement et cela est dû principalement à la croissance démographique élevée, précisément en Amérique centrale, en Afrique et en Asie ce qui pousse les grandes industries mondiales de sucre à multiplier leurs productions [1].

I.6.b. Composition et structure du sucre :

Le saccharose est un disaccharide ou diholoside non réducteur, les deux sucres qui le composent sont le dextrose (glucose) et le lévulose (fructose), sa formule chimique brute est $C_{12}H_{22}O_{11}$. Sa masse moléculaire est 342g/mol [2].

I.7. Procédés de raffinage de sucre liquide :

Ce procédé, contient différentes opérations qui permettent d'obtenir un sucre raffiné, le plus pur possible, et une mélasse contenant le maximum d'impuretés venant du sucre brut et le minimum de sucre, ceci dans les conditions les plus économiques possibles.

I.7.a. Section 1 : Affinage et fonte

L'affinage consiste à enlever les couches d'impuretés présentes à la surface des cristaux du sucre brut. Après pesage le sucre roux est mélangé avec une quantité (d'eau au démarrage) de liqueur d'affinage saturé en sucre puis malaxé pour permettre la diffusion des impuretés superficielles sans provoquer la fonte des cristaux.

- La séparation du sucre et l'égout d'affinage se fait par une centrifugeuse d'eau et une essoreuse discontinue. Le sucre affiné obtenu est ensuite fondu à l'eau dans un fondeur de façon à obtenir un sirop. L'égout contenant les impuretés est traité dans le procès pour extraire le sucre résiduel [3].

I.7.b. Section 2 : Carbonatation et filtration

Si on introduit dans le jus un excès de chaux qui va réagir avec le sucre il donnera des

Sacrâtes de chaux. Il reste, donc, à dissocier ces sacrâtes afin de libérer le sucre, on doit donc le pomper dans une chaudière de premier carbonatation ou l'on refoule du CO_2 ce dernier libère le sucre et en se combinant à la chaux, donne un précipité insoluble (CaCO_3). Le jus carbonaté est clarifié par décantation, puis par des filtrations au moyen de filtres soit continus, soit discontinus.

- L'opération de filtrage s'effectue sous vide, le jus clair pénétrant à l'intérieur du tambour est repris par une pompe et refoulé vers la deuxième carbonatation, puis il est acheminé vers les filtres presses pour obtenir un jus parfaitement clair [4].

I.7.c. Section 3 : Décolonisation

Cette opération, permet l'élimination des fines particules d'impuretés telles que les cendres et les sels minéraux, qui n'étaient pas précipitées lors de la carbonatation et qui pourront maculer la blancheur du sucre. Elle consiste en l'adsorption des particules sur les résines échangeuses d'ions [1].

I.7.c.1. Etapes de la fabrication du sucre liquide :

❖ Déminéralisation :

- Déminéralisation et décoloration plus poussée: Si l'usine produit de l'inverti, le sirop déminéralisé est envoyé vers l'unité 200 (HYDROLYSE), sinon vers l'unité 300 (CHARBON-FILTRATION) pour la production de sucre liquide.
- Un système d'échangeur de chaleur en sortie des colonnes en production permet d'économiser des coûts en énergie.
- Débit estimé en production pour une colonne: 15,5 m³/h.
- Température en production: 40°C.
- Durée d'un cycle de séquentielle colonne (résines): 24h.
- Indice de bonne production: Conductivité en sortie la plus faible possible (voisine de 0 μS/cm).

❖ Hydrolyse :

- Couper le chaînage moléculaire Glucose- Fructose qui constitue le saccharose : Le fonctionnement en régénération de la colonne d'hydrolyse est lié à la colonne en régénération dans l'unité 100. Débit total (colonne + by-pass) estimé en production : 31,0 m³/h. Débit d'hydrolyse estimé en production (colonne) : 24,0 m³/h. Température en production: 40°C.

❖ Filtration-Charbon :

- Désodorisation, décoloration et éliminer le mauvais goût. Donc La fonction de cette unité est de désodoriser, puis filtrer le produit venant soit de l'unité de déminéralisation (unité 100) dans le cas de la production de sucre liquide, soit de l'unité d'hydrolyse (unité 200) dans le cas de la production d'inverti.

Cette unité comprend 2 grandes parties:

- 1/ Le traitement du produit par charbon
- 2/ L'élimination du charbon

❖ Pasteurisation et filtration stérile :

- Eliminer les micro-organismes. Donc La fonction de cette unité est de stériliser le produit venant de l'unité de charbon -filtration avant d'être concentré puis stocké. Cette unité comprend 2 grandes parties :

1/ La pasteurisation: Ce dernier assure un passage à 105°C sous pression avec une longueur de 40m en 20 secondes. Le fonctionnement est à 34 m³/h si 2 filtres fonctionnent ou à 17 m³/h lorsqu'un seul filtre fonctionne.

2/ La filtration stérile: Elle est assurée grâce à des filtres à plaque identiques.

Débit de production pour un filtre: 17m³/h.

Température de stérilisation: 105°C.

Si le débit total passant au travers de l'unité 400 est de 34m³/h avec 2 filtres en production, alors que le débit moyen de l'usine est de 31 m³/h, c'est pour recouvrir la perte en débit (volume) durant le dé bâttissage d'un filtre. Ainsi, le niveau moyen du bac T400 pour 24 h sera maintenu.

I.7.d. Section 4 : Concentration

Le jus est ensuite concentré par évaporation d'eau. L'installation d'évaporation est constituée d'une série de colonnes groupées en « corps évaporateur ». Le premier corps est chauffée avec de la chaleur vive à la haute pression (2 à 3 kg /cm²).Le second corps sera alimenté par la vapeur à plus basse pression engendrée par évaporation d'eau produit dans le premier corps, et ainsi de suite jusqu'au 4ème corps, qui est lui-même sous vide, ce type d'évaporation est appelé aussi « évaporation à multiples effets » et l'avantage d'être économique au niveau calorifique.

I.7.e. Section 5 : Stockage expédition

La fonction de cette unité est le stockage et chargement du produit final concentré, cette unité comprend 5 bacs de stockage de 300 m³ chacun, de 3 quais stérilisation et chargement camion, et d'une zone de prélavage camion avec possibilité de stérilisation.

I.8. Principaux bénéfices obtenus par l'utilisation des sucres liquides :

- Qualité accrue :
 - Complète déminéralisation.
 - Sirop hautement transparent.
- Produit prêt à l'emploi.
- Pas d'eau de qualité particulière à fournir pour la refonte.
- Livraison par camion-citerne.
- Facilité de stockage.
- Manutention aisée.

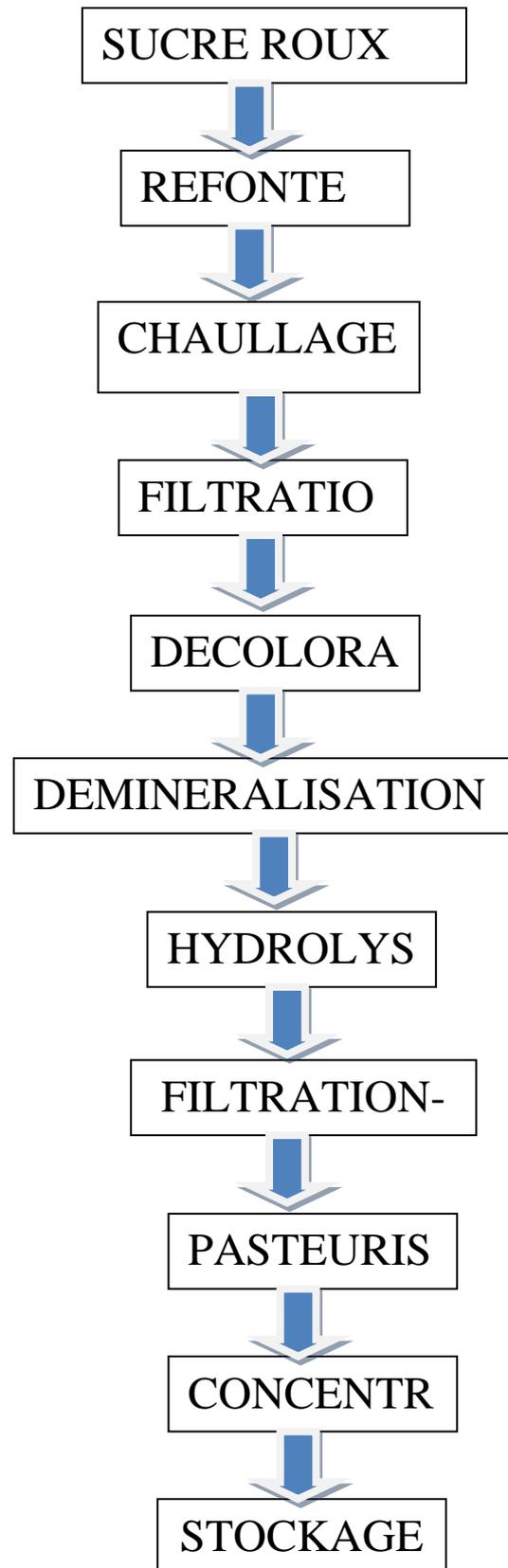
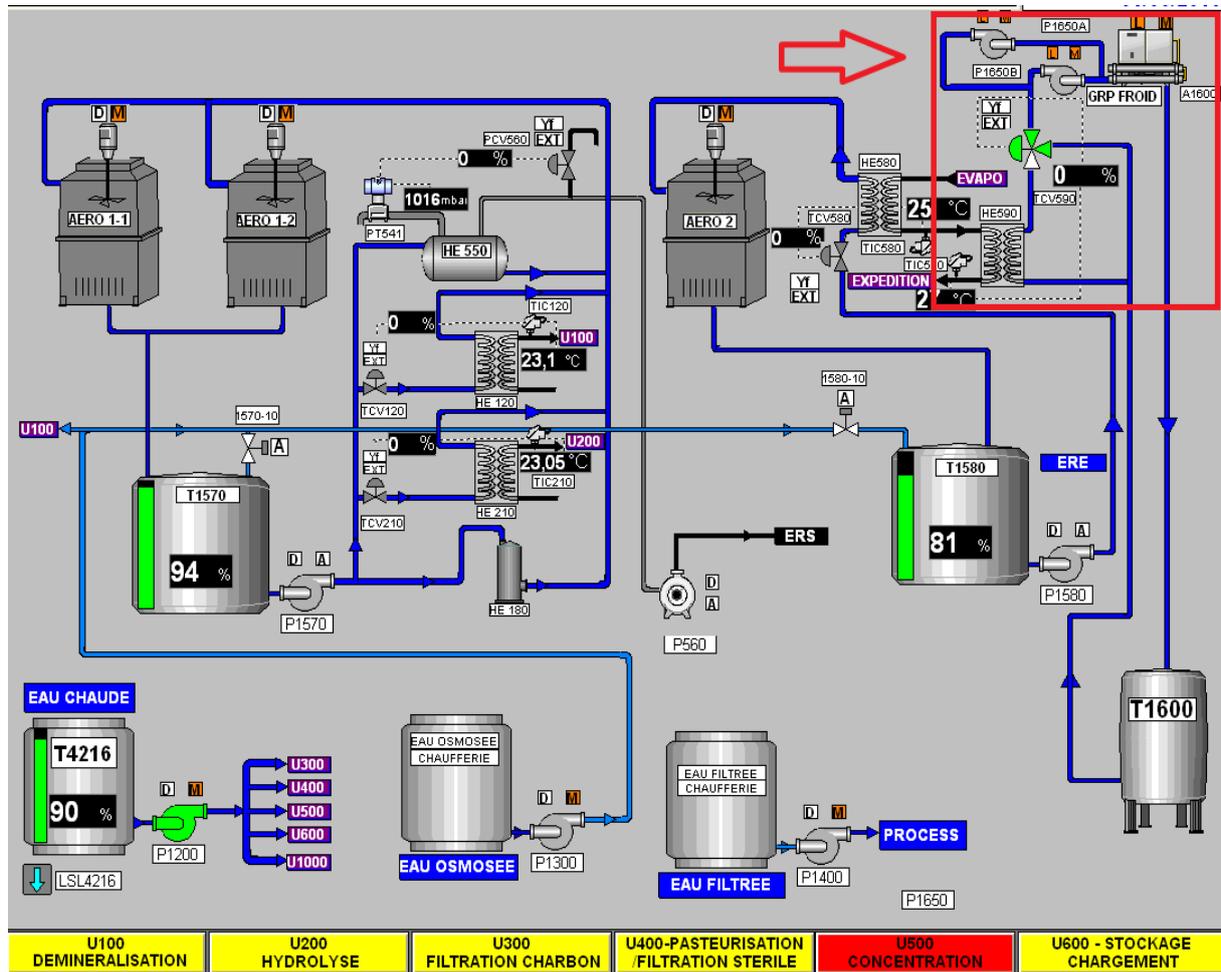


Figure.I.1 : Process de fabrication du sucre liquide

- ❖ Voilà un schéma unifilaire qui représente des multiples opérations que en vas effectuer pour le dimensionnement d'un groupe frigorifique pour stockage du sucre liquide.



A decorative rectangular border surrounds the page. It features four ornate floral corner pieces and four quill pen motifs, one on each side, positioned at the midpoints of the border lines.

Chapitre **II**

II. Généralités sur le froid

II.1. La production du froid :

L'homme fut exposé depuis longtemps aux problèmes de la conservation des aliments, ce qui l'a poussé à réfléchir pour trouver un moyen de les garder sous une basse température.

La production du froid est la réalisation d'une opération contre nature, c'est-à-dire ; absorber de la chaleur à température assez basse et la rejeter dans un milieu plus chaud, pour cela, comme l'explique très bien le deuxième principe de la thermodynamique, il faut consommer de l'énergie mécanique [5].

II.2. Domaine d'utilisation du froid :

Les propriétés de corps et les mécanismes pouvant être gravement touchés par la variation de la température, sont extrêmement diverses, ce qui induit la diversité des domaines d'utilisation du froid.

- **Domaine médical** : cryochirurgie, conservation de certains produits (organes)



Figure.II.1 : conservation des produits médicaux

- **Industries alimentaires** : conservation des aliments, pasteurisation des Liquides...



Figure.II.2 : conservation des aliments

- **Industries chimiques et pétrochimiques** : liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinage, débenzolage.
- **Génie civil** : refroidissement des bétons, congélation des sols aquifères...
- **Conditionnement des locaux** : rafraîchissement de l'air, conditionnement des patinoires, canons à neige...
- **Laboratoires d'essai et de recherche** : étude des matériaux et comportement de la matière à très basse température...



Figure.II.3 : conservation des produits chimiques

- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température (-80 °C). [6]
- **les industries mécaniques** : pour le durcissement des matériaux ou le traitement des surfaces.

II.3. Différents principes de production du froid :

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

Parmi les différentes modes de production du froid, il faut retenir :

- ❖ La sublimation d'un solide (cas du CO_2) ;
- ❖ La détente d'un gaz comprimé ;
- ❖ La fusion d'un corps solide ;
- ❖ Le refroidissement thermoélectrique ;
- ❖ La dissolution de certains sels ;
- ❖ La désaimantation adiabatique ;
- ❖ La vaporisation d'un liquide en circuit fermé ;
- ❖ La sublimation d'un solide consiste à le faire passer de l'état solide vers l'état gazeux ;

L'effet Peltier consiste en un dégagement ou absorption de chaleur accompagnant le passage d'un courant électrique à travers une jonction P-N isotherme de deux métaux ou de deux semi-conducteurs. L'effet 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 [7].

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 biohermes.

III. Définition d'une machine frigorifique :

Une machines frigorifique, est une machine thermodynamique destinée à assurer le froid d'un local ou d'un système à partir d'un source de chaleur externe dont la température est supérieure à celle du local ou du système à refroidir.

C'est donc un système de froid qui transfère des calories d'un milieu à haute niveau de température vers un milieu où la température doit être inférieure.

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

L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps froid vers un corps chaud, on peut définir également la machine frigorifique comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est-à-dire d'un milieu chaud vers un milieu froid. Une dépense d'énergie sera bien entendu inévitable pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système ait un quelconque intérêt [8].

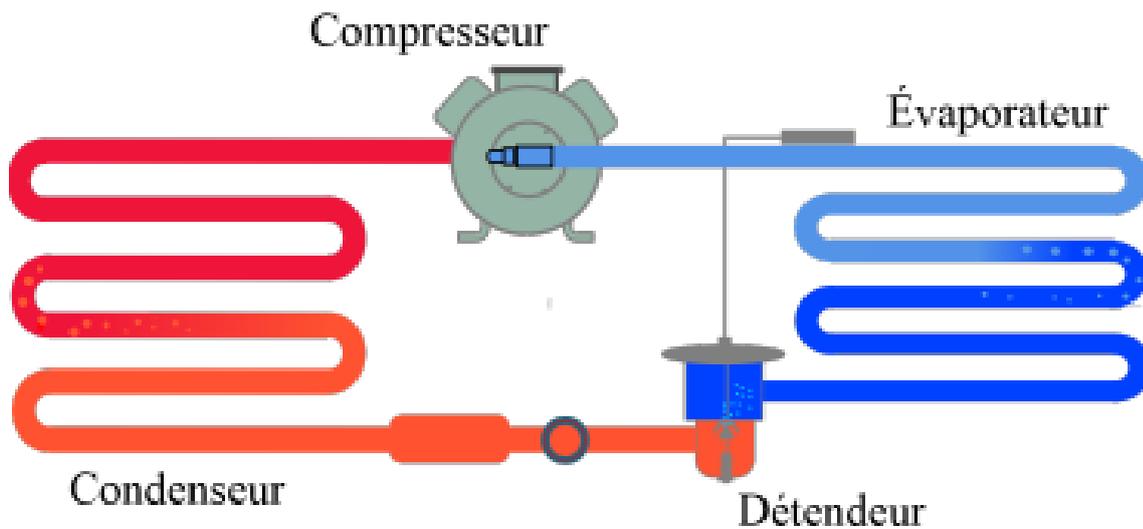


Figure.II.4 : Schéma de base d'une machine frigorifique

III.1. Différents types des machines frigorifiques :

- ❖ **Machine frigorifique à compression :** Les vapeurs issues de l'évaporateur sont aspirées par un compresseur mécanique. En raison de leur simplicité ces machines sont les plus répandues, consommant strictement de l'énergie mécanique, elles entrent dans la catégorie des systèmes au moins diathermes.

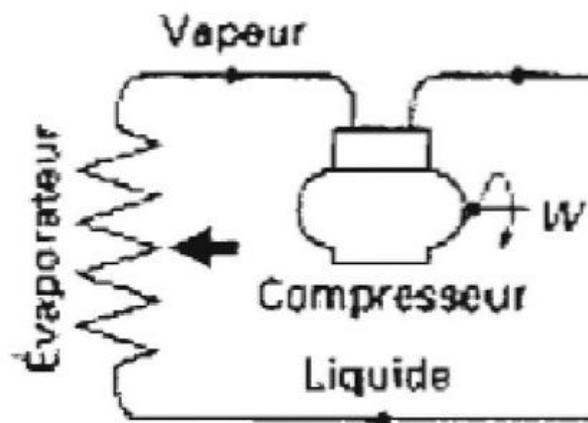


Figure.II.5 : Machine frigorifique à compression

- ❖ **Machine frigorifique à éjection :** Les vapeurs du cycle frigorifique sont aspirées mécaniquement par un éjecteur. Celui-ci fonctionne grâce à l'énergie cinétique de la vapeur motrice (généralement de même nature que la vapeur de frigorigène) qui, par l'injecteur I, traverse dans la partie convergente, II, de l'éjecteur. La compression du

mélange des vapeurs motrice et de frigorigène s'effectue dans La partie divergente, ces systèmes ont une application assez rare.

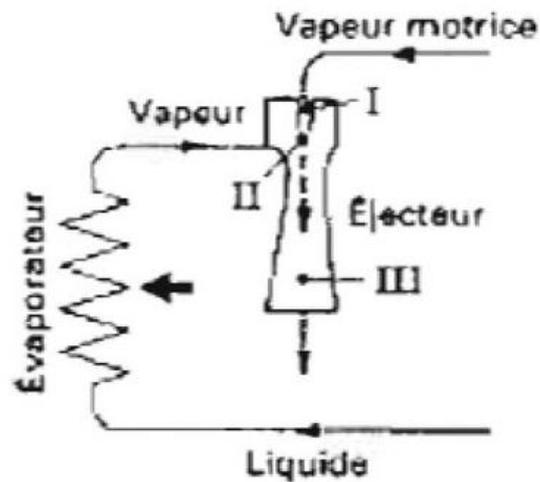


Figure.II.6 : Machine frigorifique à éjection

- ❖ **Machine frigorifique à adsorption** : L'affermissement de la vapeur de frigorigène se fait ici sur la surface d'un solide qui est l'adsorbant. Il présente une grande affinité pour le frigorigène. L'adsorption de la vapeur s'accompagnant d'un fort dégagement de chaleur, surtout dans le cas de la formation d'un composé chimique, l'adsorbant, relié à l'évaporateur du système frigorifique, doit comporter donc un échangeur interne de refroidissement. La masse de frigorigène adsorbé est limitée par la capacité d'adsorption de l'adsorbant. Contrairement aux autres systèmes qui permettent une production continue de froid, les systèmes à adsorption ont un fonctionnement irrégulier. L'extraction du frigorigène adsorbé se faisant par chauffage, les systèmes à adsorption entrent dans la catégorie des systèmes au moins tri-thermes et sont très peu utilisés en pratique.

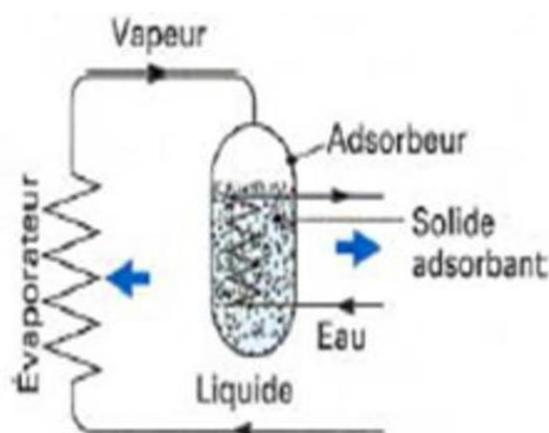


Figure.II.7 : Machine frigorifique à adsorption

- ❖ **Machine frigorifique à absorption** : Pour ce type de machine, l'aspiration de la vapeur de frigorigène se fait par l'intermédiaire d'un liquide absorbant qui présente une grande affinité pour ce fluide. La vapeur est absorbée par tout le volume du liquide absorbant et l'aspiration a lieu. L'évaporateur est relié à l'absorbeur, à l'intérieur duquel est pulvérisée en permanence la solution absorbante pauvre en frigorigène, afin d'accroître la surface de contact avec la vapeur de frigorigène. Le liquide absorbe la vapeur du fluide frigorigène donnant lieu à l'aspiration d'une nouvelle masse de frigorigène issue de l'évaporateur. La solution enrichie en frigorigène (solution riche) quitte l'absorbeur, et elle est dirigée vers un autre point de la machine où, par chauffage, on procède à l'extraction du frigorigène fixé. Les systèmes à absorption appartiennent donc à la catégorie des systèmes frigorifiques au moins tri thermes. L'absorption du frigorigène par la solution absorbante est exothermique ce qui impose l'usage d'un échangeur de chaleur pour le refroidissement de la solution absorbante. Les systèmes à absorption ont été les premières machines frigorifiques industriellement opérationnelles. Le développement des systèmes à compression les a confinés dans des applications bien précises. [9]

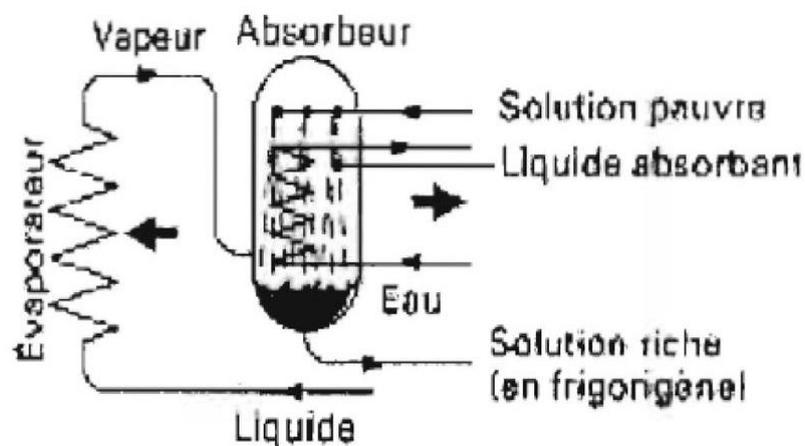


Figure.II.8 : Machine frigorifique à absorption

III.2. Le cycle frigorifique :

Le cycle frigorifique d'une machine frigorifique est habituellement représenté dans le diagramme thermodynamique enthalpie (h) - pression (Log P) appelé diagramme de Molliere ou diagramme des frigoristes.

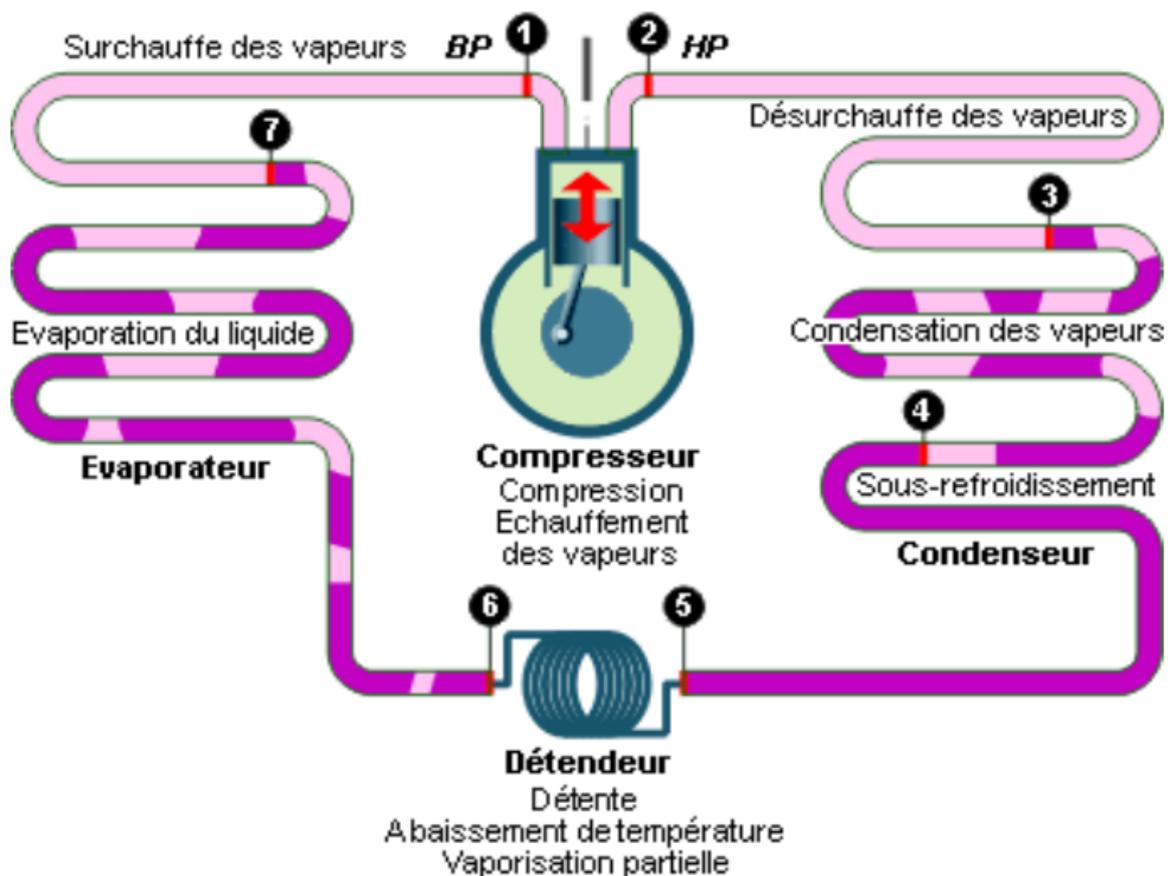


Figure.II.9 : Schéma de la machine frigorifique de base.

Suivant le schéma de la machine frigorifique de la figure II.6, le fluide frigorigène (FF) circulant dans le circuit frigorifique suit les évolutions suivantes :

Entre 1 et 2 : compression des vapeurs de fluide frigorigène (FF) qui passent d'un niveau de basse pression (BP) à un niveau de haute pression (HP)

Entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (FF) haute pression (HP)

Entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de fluide frigorigène (FF) haute pression (HP) qui deviennent du fluide frigorigène (FF) liquide haute pression (HP)

Entre 4 et 5 : sous refroidissement du fluide frigorigène (FF) liquide haute pression (HP)

Entre 5 et 6 : détente du fluide frigorigène (FF) liquide haute pression (HP) qui devient un mélange de liquide basse pression (BP) et d'une faible quantité de vapeurs basse pression (BP)

Entre 6 et 7 : évaporation du fluide frigorigène (FF) liquide basse pression (BP) qui devient des vapeurs de fluide frigorigène (FF) basse pression (BP)

Entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (FF) basse pression (BP)

Les différentes évolutions du fluide frigorigène FF de la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpique, il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes.

III.2.a. Diagrammes thermodynamiques :

Pour l'étude d'un cycle de fonctionnement d'une installation frigorifique, nous pouvons utiliser plusieurs diagrammes, ou seront représentées les différents étapes de l'évolution du fluide frigorigène lors de ses transformations.

Ces diagrammes, permettront de sélectionner le matériel frigorifique (compresseur, évaporateur, condenseur, tuyauteries, détendeur...), et de mieux comprendre le fonctionnement de ces installations.

III.2.b. Les différents diagrammes :

- ❖ Le diagramme en coordonnées pression et volume (diagramme d'Andrews) ; diagramme peu pratique et pauvre en grandeur physiques.
 - ❖ **Le diagramme entropique** : c'est un diagramme compliqué, qui visualise directement les transferts de chaleur effectué (air sous –tendue).
 - ❖ **Le diagramme de frigoristes** : ce diagramme est traditionnellement utilisé dans l'étude des cycles récepteurs (pompes à chaleur ou machines frigorifiques)
 - ❖ **Le diagramme enthalpie** : ce diagramme appelé quelquefois diagramme de Mollier il représente en fait la fonction $H = f(\lg p)$, n'est qu'une transformation du précédent ,destiné à montrer directement les transferts d'énergie en systèmes ouverts, et présenter l'avantage de l'enthalpie qui intervient en clair dans les coordonnées et qui peut donc être lue sans difficulté.
- La figure.II.10 donne, à titre d'exemple le diagramme correspondant au R134a

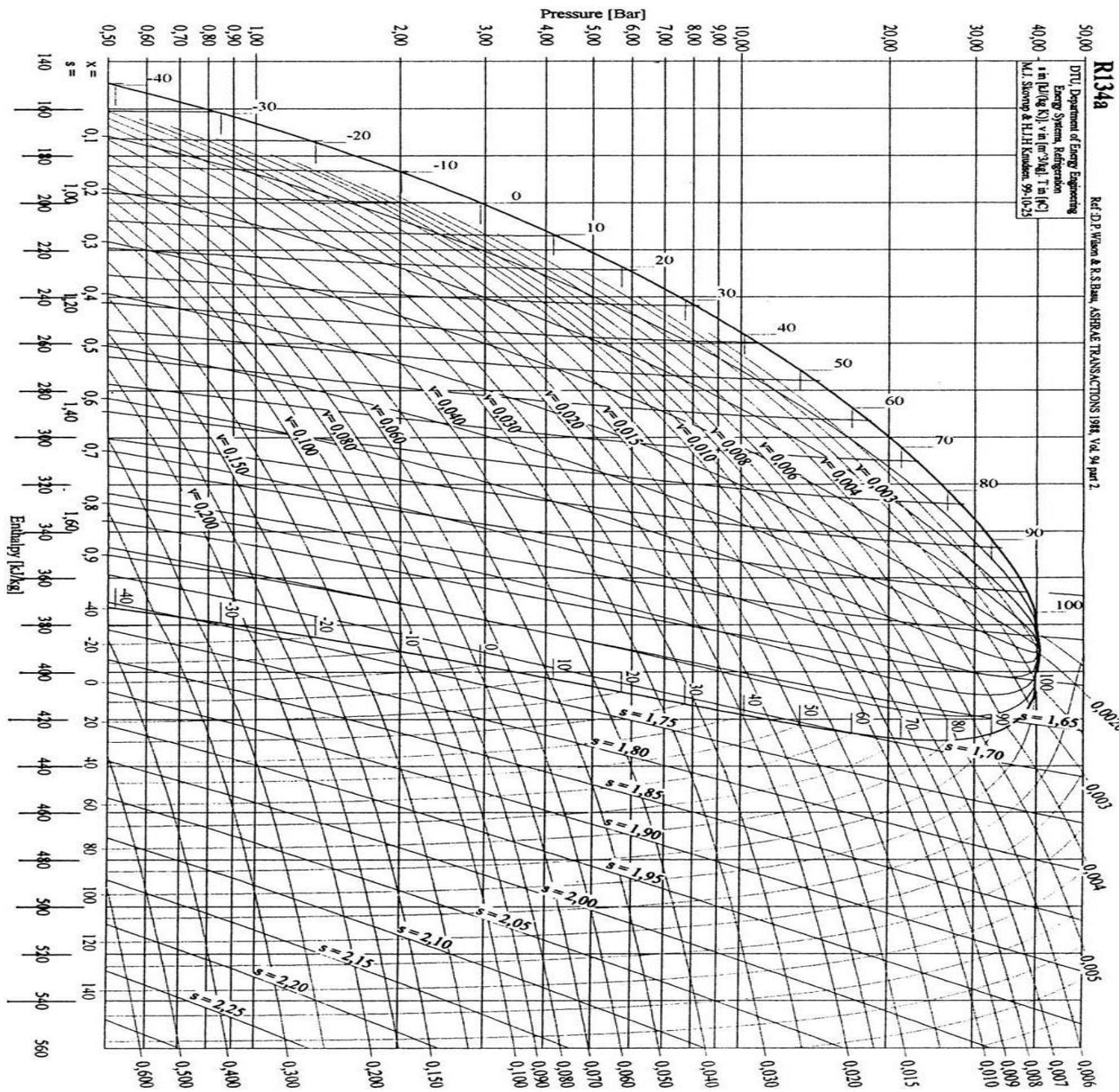


Figure.II.10 : Exemple d'un diagramme enthalpique (R134a)

III.3.Coefficient de performance (COP) ou (ϵ_f) :

La qualité d'un cycle inverse idéal est approchée par une notion analogue à la notion de rendement d'une machine motrice. Dans ce cas, il s'agit du coefficient de performance (COP). Ce dernier est obtenu en faisant le rapport de l'effet thermique sur la dépense énergétique nécessaire à l'obtention de l'effet précédent.

On se réfère souvent à la puissance effective comme puissance fournie

$$\text{COP} = \frac{\text{Energie thermique utile}}{\text{dépense énergétique}} = \frac{\Phi_0}{P_{\text{eff}}} \quad (\text{II.1})$$

- Dans le cas de la machine frigorifique idéale (Carnot) et à partir du premier principe de la thermodynamique on obtient :

$$|W| + |Q_0| - |Q_k| = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$W = Q_k - Q_0 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- W : le travail massique fourni à la machine en kJ ;
- Q_0 : la chaleur massique absorbée à la source froide en kJ ;
- Q_k : la chaleur massique cédée à la source chaude en kJ ;

D'autre part :

$$\text{COP} = \frac{Q_0}{W} = \frac{Q_0}{Q_k - Q_0} \quad (\text{II.4})$$

La machine étant par hypothèse réversible, l'égalité de Clausius nous donne :

$$\text{COP} = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad (\text{II.5})$$

T_0 et T_k étant respectivement les températures de la source froide et de la source chaude en K

Remarque : On évite de donner le nom du rendement à une quantité qui peut être notablement supérieure à l'unité [1].

III.4.Compresseur :

Le compresseur aspire le fluide frigorigène gazeux, refoule vers le condenseur après avoir comprimé à la pression nécessaire de condensation.



Figure.II.11: Illustration du Compresseur

III.4.1. Les types de compresseurs : parmi le plus utilisés en froid, on trouve

III.4.1. a. Les Compresseurs volumétriques : il existe plusieurs types :

- ❖ Compresseur à piston qui a plus connu est le compresseur à piston alternatif

C'est le type de compresseur le plus répandu ; la compresseur des vapeurs est obtenue par le déplacement d'un ou de plusieurs piston dans une capacité donnée (cylindre) ; il faut également signaler les compresseur à piston axial (compresseurs à plateau oscillant) rencontrés surtout dans le domaine de la climatisation automobile

- ❖ Compresseur rotatifs aussi appelés compresseurs à palettes dans lesquels la compression des vapeurs est obtenue par déplacement d'un corps cylindrique creux d'une masse excentrée sur une palette mobile.
- ❖ Compresseur hélicoïdaux ou à vis parmi lesquels il faut distinguer les compresseurs mono vis (Mono rotor) et les compresseurs double vis (bi rotors),Ce sont compresseurs utilisée par l'entreprise cevital:

- Compresseur hélicoïdaux ou à vis est une machine rotative dans laquelle la variation du volume occupé par le fluide et son transfert sont obtenues par le déplacement relatif de deux mobiles en rotation continue à l'intérieur d'un « cylindre » de forme appropriée.

Les deux mobiles ou rotors ont des profils conjugués, l'un formant des lobes (rotor male), l'autre formant des alvéoles (rotor femelle). Ces profils sont décalés le long de l'axe de la machine suivant hélice à pas constant, d'où le nom de la machine.

Le cylindre ou stator a une section formée de deux cercles sécants. Il entoure étroitement les deux rotors avec un jeu très faible tant sur la périphérie que sur les fonds.

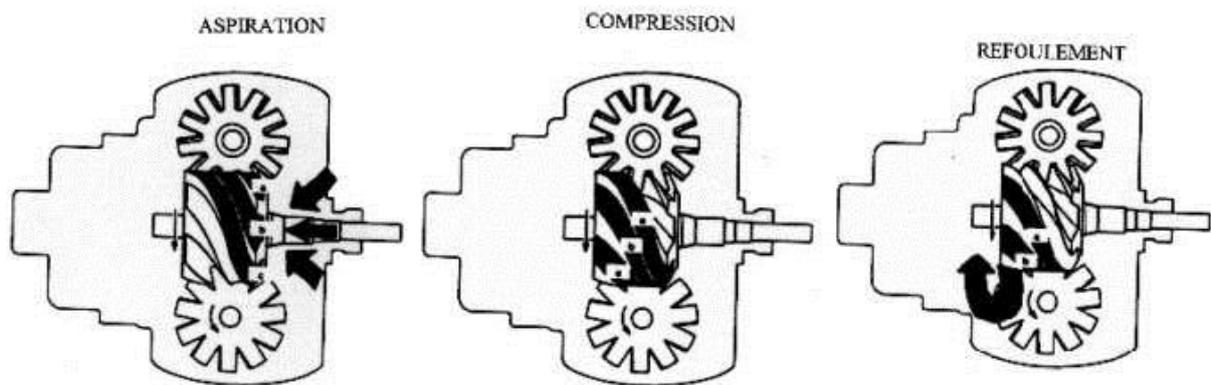


Figure.II.12: Principe de la compression à vis

- ❖ spiroïdaux ou scroll : ce compresseur utilise des rotors à trois dimensions, on peut dire, que scroll travaille en deux dimensions ce qui veut dire qu'il comporte deux spirales emboîtées l'une dans l'autre, malgré sa structure tridimensionnelle.
- ❖ Compresseurs spéciaux : les compresseurs à usage spécial sont les compresseurs à corbin, à labyrinthe à piston secs et segments spéciaux « Quiri ». Ils sont utilisés lorsque le fluide comprimé est pur et non pollué par l'huile de lubrification.

III.4.1.b. Compresseurs centrifuges :

Un compresseur centrifuge est une turbomachine qui communique l'énergie au fluide frigorigène grâce à une ou plusieurs roues tournant dans un carter. L'énergie cinétique résultant de la force centrifuge est ensuite transformée en pression statique dans un canal à

section croissante appelée volute, il trouve une application la, plus étendue dans le domaine du conditionnement de l'air.



Figure.II.13 : compresseurs centrifuges

III.5. Condenseurs : Dans toute machine frigorifique, le condenseur est l'appareil qui sert à évacuer la chaleur de condensation, dont on rappelle, qu'elle est constituée par la somme de la chaleur extraite à l'évaporateur et de l'équivalent thermique du travail de compression. Donc c'est un échangeur thermique entre le fluide frigorigène en circulation dans l'installation frigorifique et un medium de refroidissement. [11]

Il est caractérisé par trois zones de fonctionnement.

- La zone de désurchauffe qui provoque un exothermique sensible ;
- La zone de condensation qui donne une chaleur dite latente
- La zone de sous refroidissement du liquide ou il libère une chaleur sensible, jusque' à ce que la température arrive à une valeur égale à celle du médium de refroidissement.

III.5.1. Condenseur à air : On utilise l'air ambiant pour absorber la chaleur que le condenseur doit dissiper, l'air a une très faible chaleur massique, Ce condenseur est très répandu pour les petites et moyennes puissances car l'air est une source naturelle et gratuite.

III.5.2. Condenseur à eau : Technologiquement, les condenseurs à eau offrent plus de diversité que les condenseurs à air que peuvent se présenter sous quatre technologies :

- **Condenseur horizontaux** : dans le cadre du matériel industriel, ce sont les plus utilisés, car ils sont facile à installer, et assez facile à nettoyer mécaniquement, car les fonds à eau sont démontables

- **Condenseur verticaux :** ces appareils sont surtout utilisés dans l'installation à l'ammoniac. On notera cependant qu'ils sont en voie de disparition
- **Condenseur coaxiaux :** sont surtout utilisés dans des installations de petite puissance, avec des fluides halogénés
- **Condenseur à plaques :** Cette technologie plus récemment utilisée fait appel aux échangeurs à plaque du type brasé, plaques et joints, soudé, spatulaire. Le choix sera fonction du fluide frigorigène et de la nature de l'eau et de la pression de service.

III.5.3. Condenseurs évaporatifs ou évapore-condenseurs : les évapore-condenseurs sont très largement utilisés dans le froid industriel car ils combinent, en un seul appareil, un condenseur et une tour de refroidissement,

III.6. Evaporateur :

L'évaporateur est un échangeur thermique entre le fluide frigorigène en circulation dans l'installation frigorifique et un médium à refroidir.

L'évaporateur est, en définitive, l'appareil le plus important du circuit dont il est l'organe fondamental, le reste du circuit étant là uniquement pour ramener le fluide vaporisé à l'état de liquide.

Il permet de transformer le fluide frigorigène de l'état mélange liquide -vapeur à un état de vapeur à basse pression surchauffée. [11]

Il existe de nombreux types d'évaporateurs, mais ceux que l'on rencontre le plus fréquemment dans l'industrie frigorifique sont les évaporateurs tubulaires, les évaporateurs à plaques et les évaporateurs à air. [12]

III.6.a. Evaporateurs refroidisseurs d'air : Ils sont à convection naturelle ou à convection forcée.

III.6.b. Evaporateurs à circulation d'air naturelle : Ces appareils peuvent être installés au plafond des chambres (plafonniers) ou contre les parois (murales).

Ils sont utilisés lorsque l'on veut réaliser un très faible mouvement d'air et un degré hygrométrique élevé dans les chambres positives (ex. caves d'affinage de certains fromages,

triperie et abats). Ils équipent également certaines chambres négatives. Par exemple, dans des cales de chalutiers.

III.6.c. Evaporateurs ventilés : Ils sont de loin les plus répandus, qu'il s'agisse des puissances commerciales de 10 à 20 kW jusqu'à des puissances industrielles de plusieurs centaines de kilowatts.

III.6.d. Evaporateurs refroidisseurs du liquide : Le refroidissement des liquides est un problème un peu plus complexe que celui des gaz, car la multiplicité et la variété des liquides est très grande. On distingue quatre catégories : immergés, multitubulaires noyés, multitubulaires à détente sèche et à plaque.

III.6.e. Evaporateur immergés : Ces appareils sont surtout utilisés, lorsque le refroidissement du liquide ne s'accompagne pas d'un gradient de température important ou autrement dit que le débit de produit est très important, ou que l'on veut bénéficier d'un changement d'état.

III.6.f. Evaporateur multitubulaires noyés : Ces appareils sont très utilisés pour le refroidissement de l'eau glacée en conjonction avec des compresseurs centrifuges en utilisant des fluides halogénés.

III.6.g. Evaporateur à détente directe : Elle se réalise généralement au moyen de détendeurs thermostatiques, mais il est certain que les progrès qui se réalisent en permanence au niveau des détendeurs électroniques verront sous peu ces derniers supplanter les premiers. Dans tous les cas, le problème consiste, au niveau de la batterie, à obtenir le meilleur remplissage possible, avec le maximum de sécurité vis-à-vis des coups de liquide.

III.6.h. Evaporateur à plaques : Des plaques en inox soudées par point et écartées par gonflage (à forme finale de gaufrage) sont disposées verticalement avec un espacement en fonction de l'objectif défini par l'évaporateur (refroidissement ou accumulation de glace).

III.7. Détendeur :

Le détendeur mesure ou régule le débit du frigorigène liquide qui s'écoule vers l'évaporateur. Il abaisse la pression du frigorigène liquide et permet ainsi que son évaporation, Et donc l'absorption de chaleur, se produisent dans le serpentin de l'évaporateur.

[13]

Dans le circuit frigorifique, la chute de pression nécessaire au refroidissement du fluide frigorigène est obtenue par frottement (perte de charge) dans le détendeur. Il s'agit en général d'une sorte de robinet de petite taille. [14]

Le détendeur rendit la pression exercée sur le fluide réfrigérant l'or qu'il passe de la Cote haute pression à la cote basse pression du circuit frigorigène. Il régule également le flux Du fluide réfrigérant en direction de l'évaporateur.

III.7.1. Type de détendeur: détendeurs électroniques et détendeur thermostatique. [12]



Figure.II.14 : Illustrations du Détendeur

➤ **Détendeur thermostatique**

Les régulateurs de débit de fluide frigorigène les plus utilisés dans les installations frigorifiques sont les détendeurs thermostatiques.

Le rôle d'un détendeur thermostatique est de n'injecter dans l'évaporateur que la quantité de fluide frigorigène strictement nécessaire.

➤ **Détendeur électronique**

Les détendeurs électroniques par contre ne peuvent fonctionner que moyennant une énergie auxiliaire le cas contraire de détendeurs thermostatiques.

Dans ce cas, on parle d'organe de commande et régulateur électronique ou ce qu'on appelle un équipement de réglage.

III.8.Echangeur :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides.

III.8.1 Echanger à tube et calandre :

Ce type d'échangeurs est de loin le plus répandu dans les unités transformations des industries chimiques et pétrochimiques. Un faisceau de tubes est situé à l'intérieur d'une

calandre dans laquelle circule le deuxième fluide. Cette conception se retrouve également dans les condenseurs, les rebouilleurs.

III.8.2 Échangeur de chaleur à plaques :

Cette famille d'échangeurs étant aussi utilisée, ces changeurs à plaque sont constitués, comme leur nom l'indique d'un ensemble de plaques qui définissent un ensemble de canaux dans lesquels circulent respectivement chacun des fluides.

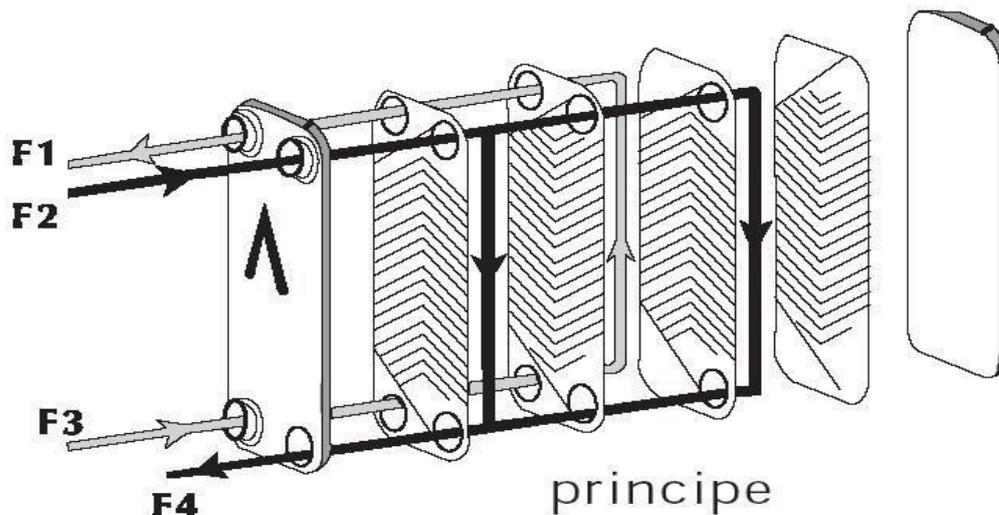


Figure.II.15 : Schéma d'un échangeur de chaleur à plaque

III.8.3 Echanger à courants croisés :

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Un fluide est dit non brassés s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, il est dit brassé dans le cas contraire. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les température dans la section droite de le veins. Les échangeurs à courants croisés surtout utilisés pour des échangeurs entre un gaz circulant en calandre et un liquide circulant dans les tubes.

IV. Calculs des différentes performances frigorifiques

➤ **Débit massique de l'installation**

$$qm = \frac{\Phi_o}{h_6 - h_5}$$

qm : débit massique [kg/s].

Φ_0 : puissance frigorifique désirée [kW].

h_5 : enthalpie massique du point 5 (entre évaporateur) [kJ/kg].

h_6 : enthalpie massique du point 6 (sortie évaporateur) [kJ/kg].

➤ **Débit volumique du compresseur aux points 1**

$$q_{v1} = qm \cdot v''_1$$

q_{v1} : Débit volumique au point 1 [m³/s]

v''_1 : Volume spécifique au point 1 [m³/kg].

➤ **Rendement volumique du compresseur**

$$\eta_v = 1 - 0.05 \times \left(\frac{Hp}{Bp} \right)$$

η_v : rendement volumétrique du compresseur

$\frac{Hp}{Bp}$: taux de compression (pression absolue)

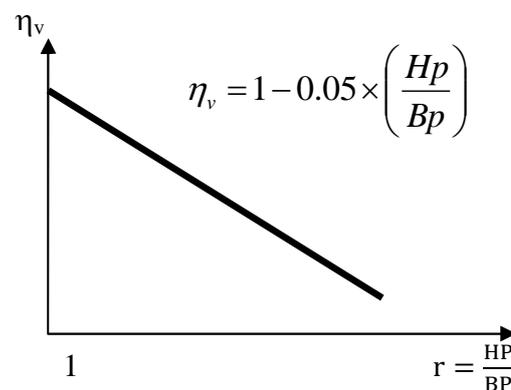


Figure.II.16 : Variation du rendement volumétrique η_v en fonction du taux de

compression $r = \frac{HP}{BP}$

➤ **Volume balayé du compresseur**

$$q_{vb} = \frac{q_{v1}}{\eta_v}$$

q_{vb} : volume balayé du compresseur [m^3/s].

➤ **Rendement effectif d'un compresseur**

C'est ce rendement qui permet de déterminer le travail absorbé par l'arbre du compresseur réel à partir du travail absorbé par le compresseur parfait et isentropique.

$$\eta_{eff} = \eta_i \cdot \eta_m$$

η_{eff} : rendement effectif du compresseur

η_i : rendement indiquée \cong rendement volumétrique

η_m : rendement mécanique

➤ **Puissance théorique du compresseur :**

$$P_{thcp} = qm \cdot (h_2 - h_1)$$

P_{thcp} : Puissance théorique du compresseur [W].

➤ **Puissance effective absorbée par le compresseur**

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

P_{eff} : Puissance effective absorbée par le compresseur [kW].

➤ **Puissance rejetée au condenseur**

$$\Phi_k = qm \cdot (h_2 - h_3)$$

Φ_k : Puissance rejetée au condenseur [kW].

➤ **Coefficient de performance frigorifique (COP)**

$$COP = \frac{\Phi_{o \text{ utile}}}{P_{eff}}$$

P_{eff} : puissance effective du compresseur.

Φ_o : Puissance frigorifique produite.

A decorative rectangular border surrounds the page. It features four ornate floral corner pieces and four quill pen motifs, one on each side of the border.

Chapitre **III**

III. Le Fluide frigorigène :

Un fluide frigorigène est le support matériel du transfert de chaleur dans un cycle frigorifique, il permet de produire du froid en captant la chaleur d'une source froide et en la cédant à une source chaude. Quand on modifie sa pression, il peut se vaporiser et se condenser à des températures proches de celles de notre environnement.

- ❖ **Rôle :** Les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer les transferts de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur de la machine. Ils évoluent cycliquement dans le circuit de la machine absorbant de la chaleur dans l'évaporateur et en cédant de la chaleur dans le condenseur.
- ❖ **Types :** Divers fluides frigorigènes sont utilisés dans l'application des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, le choix du fluide étant effectué en tenant compte des problèmes thermiques particuliers ainsi que d'un certain nombre de critères : thermiques, physiques et chimiques.

III.1. Leurs propriétés

III.1.a. Propriétés physiques :

Les fluides frigorigènes ont des propriétés physiques permettant d'obtenir une puissance frigorifique ou calorifique élevée, ainsi que de meilleures conditions de fonctionnement et de fiabilité des installations.

Les propriétés sont :

- Chaleur latente de vaporisation élevée, en kJ/kg et faible volume massique des vapeurs aspirées au compresseur ; ce qui entraîne une chaleur volumique en kJ/m^3 aspirée importante
- Température d'évaporation basse si possible supérieure à la pression atmosphérique
- Pression de condensation peu élevée
- Faible taux de compression
- Coefficient de compression adiabatique le plus proche de la valeur de 1
- Température de refoulement des compresseurs basse
- Température critique la plus haute

- Chaleur massique du liquide la plus faible que possible
- Titre en vapeur après détente faible

III.1.b. Propriétés chimiques

- Stabilité aux températures de refoulement des compresseurs
- Non inflammables et non explosifs (fluide fluoré uniquement. Non valable pour l'ammoniac et l'isobutane)
- Pas d'action sur les matériaux constituant l'installation
- Pas de réactions avec les constituants de l'air atmosphérique

III.1.c. Propriétés physiologiques

- Les fluides fluorés sont sans odeur, incolore et sans effet sur la santé du personnel.
- Facilité d'élaboration et faible prix de revient. [15]

III.2. Classification des fluides frigorigène :

Les fluides frigorigènes obéissent à une classification qui permet une désignation précise de chaque fluide. Cette classification est effectuée sur la base de critères différents suivant la famille ou la sous famille de fluides considérés.

Les fluides frigorigènes sont divisés en deux grandes familles que sont :

III.2.a. les composés inorganiques :

Les fluides de cette famille sont ceux de la série 700.

Le fluide le plus utilisé de cette famille est l'ammoniac (NH_3) et il est désigné par R717.

R : désigne Réfrigérant.

Le 7 : des centaines désigne la série 700

Le 17 : représentant les deux derniers chiffres désigne la masse molaire du corps (14 pour L'azote « N » et 3 pour l'hydrogène « H »)

III.2.b. les composés organiques :

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6).

Ils se divisent en trois sous familles :

1- les corps purs

2- les mélanges (de corps purs)

3- les hydrocarbures

1) Les corps purs :

Les corps purs se regroupent en trois sous-groupes suivant leur composition chimique :

- Les CFC (chlorofluorocarbone)

Exemple : R12 ; R11 ...

- Les HCFC (hydro chlorofluorocarbone) ; Il y a un remplacement partiel des atomes de chlore par des atomes de d'hydrogène.

Exemple : R22

- Les HFC (hydrofluorocarbure) ; il y a remplacement total des atomes de chlore par des atomes d'hydrogène

Exemple : R134a ; R23

Remarque : La caractéristique principale d'un corps pur est qu'il se condense et s'évapore à température et pression constante.

❖ Désignation de ces fluides :

- R = Réfrigérant
- Chiffre des centaines : nombre d'atomes de carbone – 1
- Chiffre des dizaines : nombre d'atomes de d'hydrogène + 1
- Chiffre des unités : nombre d'atomes de fluor

- La valence du carbone est 4 (Nombre d'électrons en périphérie du noyau de l'atome), on complétera avec des atomes de chlore si nécessaire.

- Le nom du fluide comporte les renseignements sur le nombre d'atomes de chlore, de fluor et l'hydrocarbure de départ : méthane (1 carbone) éthane (2 carbones) Les Halons (1 atome de brome remplace 1 atome de chlore) : Exemple R13B1 (B1 signifie 1 atome de brome)

Tableau.III.1: exprime la constitution et les renseignements sur quelques fluides

Désignation	Nbr de carbone	Nbr d'hydrogène	Nbr de fluor	Nbr de chlore	Formule de la molécule
R12	1	0	2	2	C Cl ₂ F ₂
R22	1	1	2	1	CH Cl F ₂
R134a	2	2	4	0	CH ₂ F/CF ₃

Tableau.III.1: exprime la constitution et les renseignements sur quelques fluides

2) Les mélanges :

Les mélanges de corps purs se regroupent en deux sous-groupes que sont :

- Les mélanges azéotropiques :

Ces fluides sont composés de plusieurs fluides frigorigènes (Exemple le R502= 48.8% de R22 et 51.2 de R115). Malgré leurs compositions, ils se comportent comme des corps purs. Ils ont comme but d'agrandir les gammes des fluides frigorigènes, et donc d'avoir des températures de changement d'état différentes des aux autres, pour des applications différentes, Ces fluides sont désignés par la série des R500, les 2 derniers chiffres indiquent le numéro d'ordre d'apparition sur le marché.

- Les mélanges zéotropiques :

Ces mélanges se vaporisent et se condensent, non pas à une température constante, mais sur une plage de température, Contrairement aux autres fluides, ils ne sont pas caractérisés par une seule température de saturation ou de changement d'état, mais par une température de Bulle (température de changement d'état où commence l'évaporation du fluide ou fini la condensation du fluide) et par une température de rosée (température de changement d'état où fini l'évaporation du fluide ou commence la condensation du fluide). La différence de ces 2 températures de changement d'état s'appelle le glissement.

$$(\text{Température de rosée} - \text{Température de bulle}) = \text{glissement} [15]$$

3) Les hydrocarbures :

Les fluides frigorigènes du type hydrocarbure proviennent essentiellement du raffinage du pétrole mais également du dégazolinage (récupération des hydrocarbures liquides) du gaz naturel. Ce sont essentiellement le R600 (butane), le R600a (isobutane) et le R290 (propane) qui est le plus utilisé. Contrairement aux autres fluides frigorigènes, les hydrocarbures sont hautement inflammables. Dans certaines classifications, les fluides frigorigènes du type HC (hydrocarbures) sont regroupés avec les fluides de la série 700 comme le R717 (ammoniac), le R718 (eau) ou le R744 (dioxyde de carbone) sous la famille des fluides dits « naturels ».

[16]

III.3. Critères et choix des fluides :

Compte tenu de la réglementation, il est désormais interdit d'utiliser des fluides de type CFC ou HCFC. Nous nous tournerons donc vers des HFC ou des fluides naturels tels que l'ammoniac. Il faut savoir que les HFC favorisent l'effet de serre, alors que l'ammoniac n'a aucune incidence sur l'environnement.

III.3.a. Critères thermodynamiques :

- Pressions de fonctionnement pour les températures d'utilisation.
- Taux de compression (rapport pression de refoulement / pression d'aspiration)
- Eviter de fonctionner en dessous de la pression atmosphérique (risque d'introduction d'air en cas de fuite).
- Eviter les températures de refoulement trop élevées (comportement du fluide et surtout de l'huile).
- Favoriser les fluides dont la chaleur latente de changement d'état est importante (meilleures performances énergétiques).

III.3.b. Critères économiques :

- Coût de l'installation (composants et main d'œuvre). Par exemple, l'ammoniac nécessite des tuyauteries en inox alors que les HFC acceptent le cuivre.
- Favoriser les fluides dont la chaleur latente de changement d'état est importante pour avoir un débit volume balayé par le compresseur minimal (afin de minimiser la quantité de fluide et la taille des compresseurs).
- Prix du fluide.
- Coût d'exploitation : calcul du coefficient de performance.

III.3.c. Critères de sécurité :

- toxicité : classement US : classe 1 : extrêmement toxique, classe 6 : non toxique ;
- ininflammabilité : le fluide frigorigène doit être ininflammable ;
- action sur les denrées : elle devrait être nulle ou très faible, dans le cas d'un dégagement des fluides frigorigènes dans les chambres froides.

Les fluides sont finalement regroupés, au regard de la sécurité, dans le tableau suivant : [17]

Tableau.III.2 : Groupe de sécurité pour les fluides frigorigènes.

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

Dans la norme ISO 817, un groupage simplifié est présenté :

- L1=A1 : faiblement toxique et non inflammable ;
- L2=A2, B1 et B2 : moyennement inflammable et/ou toxique ;
- L3=A3 et B3 : hautement inflammable.

La réglementation française limite l'emploi des fluides de catégorie L3.

L'ammoniac et les hydrocarbures se trouvent dans ce cas.

III.3.d. Critères physiques : Le fluide devra présenter en outre :

- Une pression d'évaporation supérieure à la pression atmosphérique ce qui permet une détection plus aisée de fuites éventuelles et empêche l'air et l'eau de pénétrer dans le circuit.
- Une faible température d'ébullition afin d'éviter d'installer un vide poussé pour obtenir l'ébullition.
- Un faible volume spécifique de la valeur saturé, ce qui augmentera la production de frigories, pour un même volume de vapeur aspiré par le compresseur.
- Une pression de condensation modérée ce qui assure une meilleure sécurité des joints dans la partie haute-pression et un meilleur rendement volumétrique du compresseur.
- Une température critique élevée pour éviter l'emploi de récipients à parois épaisses, la non inflammabilité, la non explosibilité et la non toxicité.

- une température de refoulement du compresseur (caractéristique intrinsèque de chaque fluide pour des conditions de fonctionnement données) relativement basse pour une plus grande longévité du compresseur.

III.3.e. Critères technique :

- Action sur les métaux.
- Action sur les matières plastique et élastomère.
- Stabilité thermique.
- Aptitude de fuite.

III.4. Formule chimique de différents fluides frigorigènes :

Tableau.III.3 : Formule chimique de différents fluides frigorigènes

Nom	Désignation	Formule chimique
Ammoniac	R717	NH ₃
Dichlorodifluorométhane	R12	CCl ₂ F ₂
Acide carbonique	R744	CO ₂
Monochlorofluoroéthane	R22	CHClF ₂
Trichloromonofluoroéthane	R11	CCl ₃ F
Monochlorotrifluorométhane	R13	CClF ₃
Trifluorométhane	R23	CHF ₃
Difluorométhane	R32	CH ₂ F ₂
Pentafluoroéthane	R125	C ₂ HF ₅ CHF ₂ -CF ₃
Tétrafluoroéthane	R134a	C ₂ H ₂ F ₄ CH ₂ F-CF ₃
Trifluoroéthane	R134	C ₂ H ₃ F ₃ CH ₃ F-CF ₃
Difluoroéthane	R152a	C ₂ H ₄ F ₂ CH ₃ F-CHF

III.5. Le choix d'un fluide frigorigène :

Le choix d'un fluide frigorigène repose sur les critères suivants :

- Les conditions d'utilisation (applications) du fluide frigorigène.

- Le critère économique et la disponibilité du fluide frigorigène.
- Le critère de réglementation (noms, recommandations, impacts environnementaux)

III.6. Les caractéristiques physiques du fluide frigorigène parfait :

- Chaleur latente de vaporisation très élevée.
- Point d'ébullition, sous la pression atmosphérique, suffisamment bas.
- Pas d'action sur les métaux composant le circuit (ainsi, par exemple l'ammoniac attaque le cuivre).
- Non inflammable et non explosif mélange avec l'air.
- Sans effet sur la santé du personnel.
- Sans action sur les denrées à conserver.
- Sans odeur ou n'ayant qu'une faible odeur non désagréable.
- Pas d'action sur la couche d'ozone.
- Pas d'action sur le réchauffement terrestre [18]

III.7. Les fluides frigorigènes et l'environnement :

III.7.a. L'effet de serre :

Le rayonnement solaire est absorbé par la terre et une grande partie de la chaleur emmagasinée est ensuite transmise vers l'espace par rayonnement. Les gaz présents dans l'atmosphère (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane) forment un écran qui retient une partie de cette chaleur. Sans cet écran, la chaleur s'échapperait en grande quantité et la terre serait une planète gelée avec une température de surface d'environ -20°C . Cependant, une concentration trop importante de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère entraînerait un réchauffement de la planète évalué par certains scientifiques à environ 5°C d'ici la fin du siècle prochain et donc une remontée des océans.

La valeur caractéristique utilisée pour voir l'action d'un fluide sur l'effet de serre est le G.W.P (global Warming Potential).

-G.W.P (global Warming Potential): Le potentiel de réchauffement global, il s'exprime en kilogramme équivalent en CO_2 et indique la quantité de CO_2 qui aurait un effet équivalent sur

l'effet de serre à l'émission de un kilogramme de fluide à un horizon de 100 ans. Effet la durée de vie d'un fluide halogéné est longue et il faut intégrer son effet sur une longue durée.

III.7.b. La couche d'ozone

La couche d'ozone est menacée par des émissions gazeuses dues à l'activité humaine (oxyde d'azote, hydrocarbures halogénés, méthane, gaz carbonique) perturbant la formation et la répartition de l'ozone. La quantité d'ozone peut diminuer dans la stratosphère et augmenter dans la troposphère.

Les hydrocarbures halogénés sont des composés organiques qui renferment dans leur structure des atomes de chlore, fluor ou brome ; les plus stables sont les CFC totalement halogénés (sans hydrogène), leur durée de vie est très longue (120 ans pour le R12). Une molécule de chlore peut détruire 50 000 à 100 000 molécules d'ozones [19]

-ODP (ozone depletion potential) : Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, il évalue les conséquences de l'émission d'un kilogramme de frigorigène sur la couche d'ozone comparé à celle de l'émission d'un kilogramme du R-11, [15]

Voilà un tableau qui résumant les différents fluides frigorigènes vis à vis de l'environnement.

Tableau.III.4 : Impacte des différents frigorigènes sur l'environnement [15]

Frigorigène	R12 CFC	R22 HCFC	R134a HFC	R290 Isobutane	NH3 ammoniac	CO2 Gaz carbonique
Fluide naturel	NON	NON	NON	OUI	OUI	OUI
ODP	0.82	0.055	0	0	0	0
GWP (100ans)	8100	1500	1300	20	<1	1
	112.0	96.2	101.2	96.7	132.3	31.1
Pression critique (bar)	41.4	49.9	40.6	42.5	112.7	73.8
Inflammabilité	NON	NON	NON	OUI	OUI	NON
Toxicité	NON	NON	NON	NON	OUI	NON

Coût relatif	Néant	1.0	4.0	0.3	0.2	0.1
Puissance volumétrique	1.0	1.6	1.0	1.4	1.6	8.4

III.8. Fluide frigorigène R134a :

Le fluide frigorigène R134a est un Hydrofluorocarbure 'HFC' qui ne contient pas de chlore, de la Famille de l'éthane (Tétra- fluor- éthane). Il a pour formule organique CH₂F-CF₃.

Au niveau du complexe CEVITAL on utilise le fluide R134a dans l'installation frigorifique pour le stockage du sucre liquide.

III.8.a. Propriétés thermodynamique du R134a :

Tableau.III.5 : Propriétés thermodynamique du R134a

Généralités	
Nom	1, 1, 1,2-tetrafluoroethane
Formule	CH ₂ -CF ₃
Principaux domaines d'application (sous réserve de la législation en vigueur)	Froid ménager, transport frigorifique et conditionnement d'air
Masse molaire	102,0 kg/kmol

Propriétés thermo physiques	
Temp. d'ébullition (à 0.1013 MPa)	- 26,1°C
Température critique	101,1°C
Pression critique	4,06 MPa

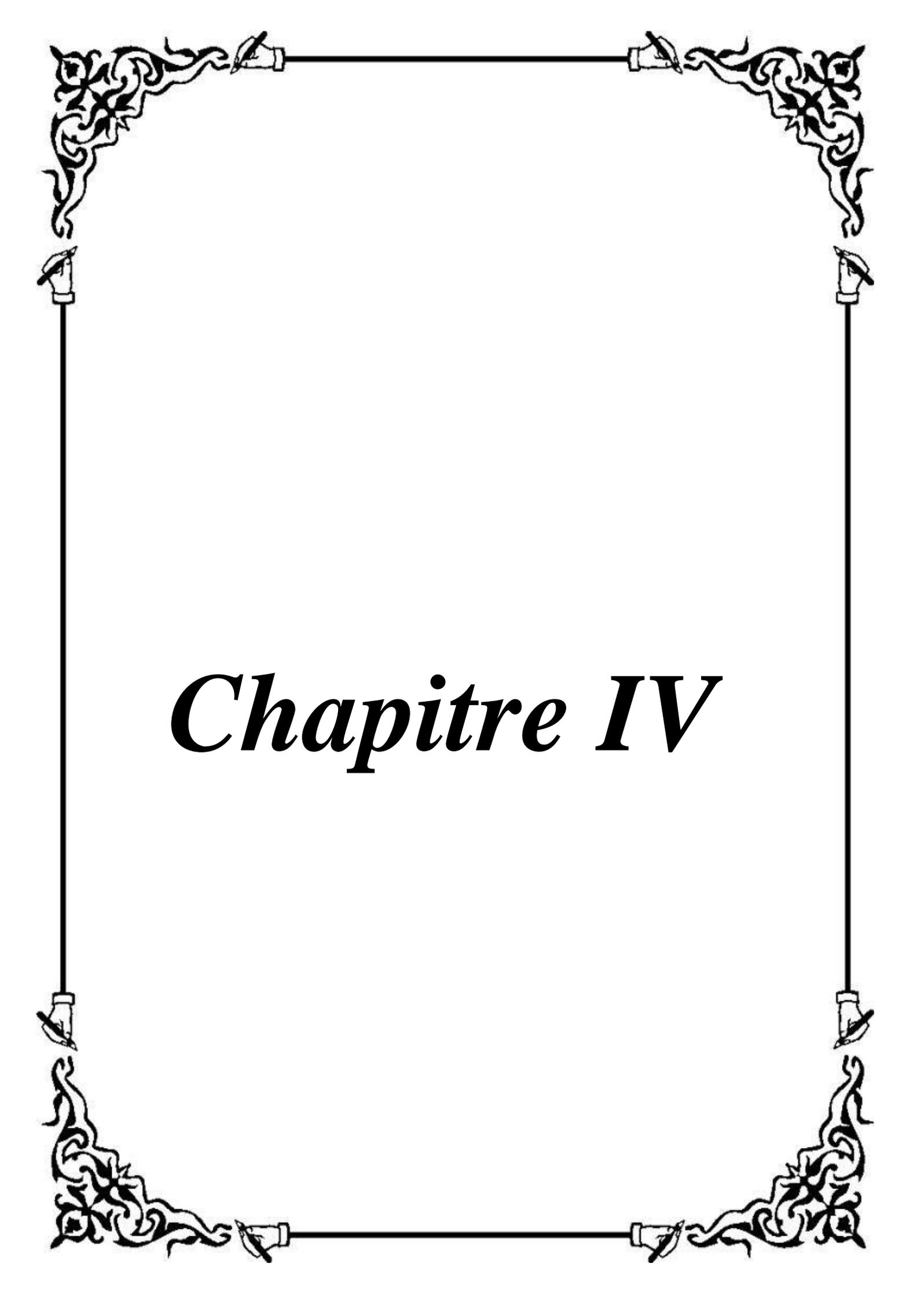
Propriétés à 0°C (à saturation)*			
	Unité SI	Liquide	Vapeur
Pression	MPa	0,29	0,29
Volume massique	dm ³ /kg	0,77	69,31
Capacité thermique massique • à pression constante • à volume constant	kJ/ (kg K)	1,34 0,88	0,90 0,76
Viscosité	10-6 Pa s	271,08	10,73
Conductivité thermique	W/ (m K)	0,092	0,012
Tension superficielle	N/m	0,012	
Chaleur d'évaporation	kJ/kg	198,6	

- Ces données sont extraites de la brochure "Propriétés thermodynamiques et physiques du R134a", publiée par l'IIF (institut international du froid), qui peut être commandée en ligne.

Propriétés environnementales	
ODP (R11=1)	0
GWP (CO ₂ =1)	1300

Le GWP utilisé comme référence est le GWP du CO₂ avec un temps d'intégration de 100 ans. [20]

Remarque : Groupe de sécurité : A1



Chapitre IV

IV.1. Analyse thermodynamique:

On va déterminer la charge frigorifique nécessaire, après on déterminera d'abord le cycle de fonctionnement, à partir des conditions à maintenir dans l'enceinte et des conditions extérieures.

IV.2. Etude de l'installation existante : une étude comparative de deux fluides frigorigènes (R134a et R717) donne le cas le plus défavorable.

➤ Présentation de notre installation : R134a

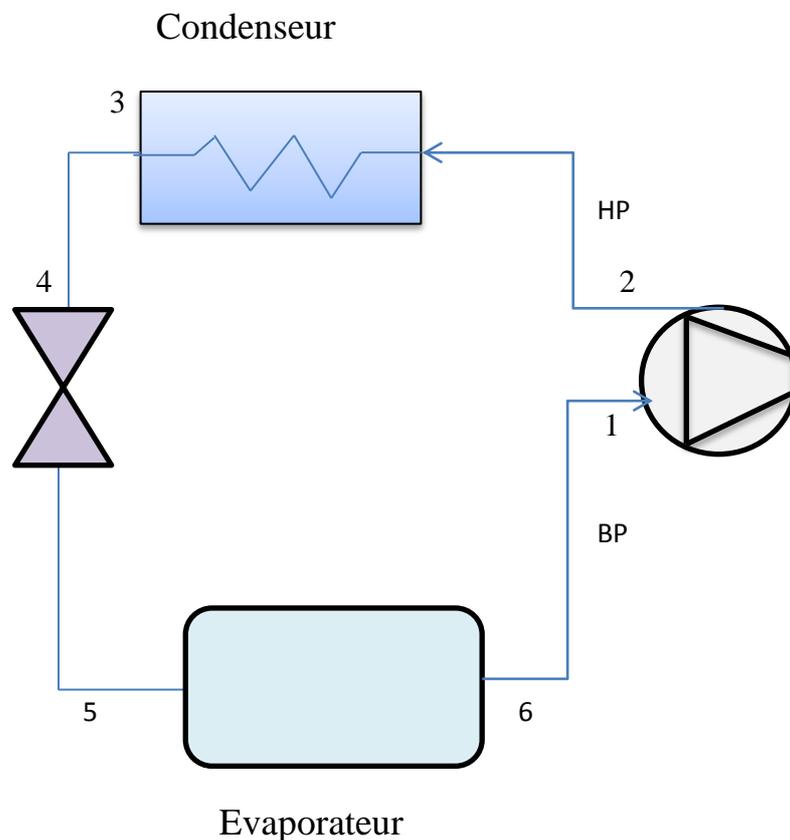


Figure.IV.1 : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple

Entre 1 et 2 : compression de vapeur de fluide frigorigène permet d'élever sa pression (de basse pression vers haute pression).

Entre 2 et 3 : le vapeur de fluide frigorigène se refroidissent (désurchauffe). Puis le vapeur de

Fluide frigorigène se condense qui deviennent fluide frigorigène liquide.

Entre 3 et 4 : le fluide frigorigène liquide sous refroidissement.

Entre 5 et 6 : le fluide frigorigène se vaporise partiellement, ce qui abaisse sa température.

Entre 5 et 6 : évaporation du fluide frigorigène liquide qui devient de vapeur de fluide frigorigène a base pression.

Entre 6 et 1 : surchauffe de vapeur de fluide frigorigène base pression.

IV.2.1. Etude avec R-134a :

a- Le régime de fonctionnement:

- HP = 11, 96 bar $\rightarrow \theta_k = 46 \text{ }^\circ\text{C}$,
- BP = 2, 43 bar $\rightarrow \theta_0 = - 5 \text{ }^\circ\text{C}$,
- La surchauffe dans l'évaporateur est négligeable,
- La surchauffe à l'entrée du compresseur est de $10 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Le sous – refroidissement dans le condenseur est négligeable,
- Le sous – refroidissement à l'entrée du détendeur est de $6 \text{ }^\circ\text{C}$.

b-Tracé du cycle sur le diagramme des frigoristes (Figure.IV.2) :

Tableau IV.1 : coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle du R-134a.

Points	Température [°C]	Pression [bar]	Volume massique [m ³ /kg]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kg K]
1	5	2.43	0.0864	403	1,759
2 _s	60	11.96	0,0184	437	1,759
2	70	11,96	0,0195	448	1,790
3	46	11.96	0,00089	265	1,2186
4	40	11.96	-	255	-
5	- 5	2.43	0,0175	255	1,209
6	- 5	2.43	0,0828	394	1,7242

➤ Puissance frigorifique brute

Débit d'eau :

$$\Phi_0 = q_{me} \cdot C_e \cdot \Delta\theta_e$$

T_{SEG} : Température de sortie de l'eau.

T_{EEG} : Température d'entre de l'eau.

$$\Delta\theta_e = (T_{EEG} - T_{SEG}) = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

C_p ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) capacité thermique massique à pression constante de l'eau

$$(c_p = 4,185 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

$$\Phi_0 = 30,7 \times 4,185 (12 - 8) = 642,47 \text{ kW}$$

IV.2.2 Calcul des performances thermodynamiques

- **Débit du fluide frigorigène R134a :**

$$\Phi_0 = q_m (h_6 - h_5) \quad \text{Avec :}$$

- q_m : débit massique du fluide frigorigène,
- h_6 : enthalpie du point 6,
- h_5 : enthalpie du point 5,

$$q_m = \frac{\Phi_0}{(h_6 - h_5)} = \frac{642,47}{139}$$

$$q_m = 4,62 \text{ kg/s}$$

- **Taux de compression τ :**

$$\tau = \frac{P_K}{P_0} = \frac{11,96}{2,43}$$

$$\tau = 4,93$$

- **Le rendement volumétrique du compresseur η_v :**

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times \tau$$

$$\eta_v = 0,75$$

- **Le rendement indiqué (η_i) :**

$$\eta_i \cong \eta_v$$

$$\eta_i = 0,75$$

- **Le rendement mécanique (η_m) :**

$$\eta_m = 0,86$$

- **Le rendement effectif (η_{eff}) :**

$$\eta_{eff} = \eta_i \cdot \eta_m = 0,75 \cdot 0,86$$

$$\eta_{eff} = 0,6$$

- **Calcul de h_{2r} :**

$$\eta_i = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_i}$$

$$h_{2r} = 403 + \frac{437 - 403}{0,75} \Rightarrow h_{2r} = 448 \text{ kJ/kg}$$

- **Puissance théorique absorbée par le compresseur :**

$$P_{thcp} = \dot{q}m \times (h_{2s} - h_1) \quad \text{avec:}$$

$$h_1: \text{enthalpie du point 1} \quad h_1 = 403 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s}: \text{enthalpie du point 2} \quad h_{2s} = 437 \text{ kJ/kg}$$

w_{thcp} : le travail théorique absorbé par le compresseur

P_{thcp} : puissance théorique absorbée par le compresseur

$$w_{thcp} = (h_{2s} - h_1)$$

$$w_{thcp} = (437 - 403)$$

$$w_{thcp} = 34 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{thcp} = 4,62 \times (437 - 403)$$

$$P_{thcp} = 157,08 \text{ kW}$$

- **Le travail effectif du compresseur (w_{eff}) :**

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

$$w_{eff} = \frac{34}{0,6}$$

$$w_{eff} = 56,67 \text{ kJ/kg}$$

- **La puissance effective du compresseur (P_{eff}) :**

$$P_{eff} = \dot{q}m \cdot w_{eff} = 4,62 \cdot 56,67 \quad P_{eff} = 261,81 \text{ kW}$$

- **Puissance du moteur électrique**

$$P_{elec} = 1,2 \times P_{eff}$$

$$P_{\text{élec}}=1,2 \times 261,81$$

$$P_{\text{élec}}=314,17 \text{ kW}$$

- **Chaleur et puissance cédée au condenseur Φ_k :**

- **Quantité de chaleur (Q_k) :**

$$Q_k=h_{2\text{réel}}-h_4$$

$$Q_k=448,33-255$$

$$Q_k=193,33 \text{ kJ/kg}$$

- **Puissance cédée au condenseur Q_k :**

$$Q_k=qm \times (h_{2\text{réel}}-h_4)$$

$$Q_k=4.62 \times 193,33 \quad \Phi_k=893,18 \text{ kW}$$

- **Calcule du coefficient de performance COP :**

$$\text{COP}=\frac{\Phi_0}{P_{\text{eff}}}=\frac{642,47}{261,81}=2,45$$

IV.2.3. Dimensionnement des canalisations:

- **Canalisation de refoulement:**

$$q_{VR}=V''_2 \times q_{mR143a}=S_R \times W_R$$

$$\Rightarrow S_R=\frac{V''_2 \times q_{mR143a}}{W_R} \quad [22]$$

Avec :

q_{mR143a} : débit volumique du compresseur au refoulement.

V''_2 : volume massique du R134a au point 2 et $V''_2=0.0184 \text{ m}^3/\text{kg}$

S_R : section de conduit de refoulement

W_R : vitesse des vapeurs adoptées, elle est habituellement comprise entre 6 et 25 m/s

De vitesses allant de 10 à 18 m/s sont courantes [21]

On prendra $W_R=11 \text{ m/s}$

$$S_R=\frac{0.0184 \times 4.62}{11}$$

$$S_R=77.28 \text{ cm}^2$$

➤ **Canalisation d'aspiration :**

$$q_{VA} = V''_1 \times q_{mR134a} = S_A \times W_A \Rightarrow S_R = \frac{V''_1 \times q_{mR134a}}{W_A} \quad \text{avec :}$$

q_{VA} : débit volumique des vapeurs à l'aspiration du compresseur.

V''_1 : volume massique du R134a au point 1 et $V''_1 = 0,0864 \text{ m}^3/\text{kg}$

S_R : section de conduite de refoulement.

W_R : vitesse des vapeurs aspirées, elle est de même ordre de grandeur que du refoulement, 6 et 20m/s (on adopte fréquemment des vitesses allant de 10 à 15m/s) [21].

On prendra $W_R = 13 \text{ m/s}$ comme pour les conduites de refoulement.

$$S_A = \frac{0,0864 \times 4,62}{13}$$

$$S_A = 307,05 \text{ cm}^2$$

➤ **Canalisation du liquide frigorigène :**

$$q_{VL} = V''_3 \times q_{mR134a} = S_L \times W_L \Rightarrow S_L = \frac{V''_3 \times q_{mR134a}}{W_L} \quad \text{avec:}$$

q_{VL} : débit volumique frigorigène liquide en circulation.

V''_3 : volume massique du R134a au point 3 et $V''_3 = 8,92 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$

S_L : section de conduite du liquide circulant.

W_L : vitesse du frigorigène liquide, afin de réduire les chutes de pression et éviter ainsi l'ébullition du liquide frigorigène avant le détendeur on adopte des vitesses comprises entre 0,5m/s à 1m/s

On prendra $W_L = 1 \text{ m/s}$

$$S_L = \frac{8,92 \times 10^{-4} \times 4,62}{1} \Rightarrow S_L = 41,21 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 41,21 \text{ cm}^2$$

IV.3. Etude de l'installation avec ammoniac :

Le choix de l'ammoniac comme fluide frigorigène nous impose un régime de fonctionnement à détente indirecte cela en raison de sa toxicité, Ces principales propriétés sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Propriétés thermodynamique du R717

Fluide	Caractéristiques
R717 NH₃ Ammoniac	Masse molaire : 17.03 g/mol Phase liquide Point d'ébullition (1,013 bar) : -33.33 °C Chaleur latente de vaporisation (1,013 bar au point d'ébullition) : 1369.5 kJ/kg Pression de vapeur (à 21 °C) : 8.852 bar Point critique Température critique : 132.25 °C Pression critique : 113.3 bar Phase gazeuse Masse volumique du gaz (1,013 bar au point d'ébullition) : 0.889 kg/m ³ Chaleur spécifique à pression constante (Cp) (1,013 bar et 25 °C) : 0.0369 kJ/(mole.K) Chaleur spécifique à volume constant (Cv) (1,013 bar et 25 °C) : 0.028 kJ/(mole.K) Rapport des chaleurs spécifiques (Gamma:Cp/Cv) (1,013 bar et 25 °C) : 1.316

a- Le régime de fonctionnement:

- En va étude donne le cas le plus défavorable
 - HP = 18, 33 bar → $\theta_k = 46$ °C,
 - BP = 3, 53 bar → $\theta_0 = - 5$ °C,
 - La surchauffe dans l'évaporateur est négligeable,
 - La surchauffe à l'entrée du compresseur est de 10 °C,
 - Le sous – refroidissement dans le condenseur est négligeable,
 - Le sous – refroidissement à l'entrée du détenteur est de 6 °C.

b-Tracé du cycle sur le diagramme des frigoristes (Figure.IV.4) :**Tableau IV.3 :** coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R717

Points	Température [°C]	Pression [bar]	Volume massique [m ³ /kg]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kg K]
1	5	3.53	0.3644	1482	5.781
2 _s	130	18.33	0,10089	1737	5,781
2	165	18,33	0,1115	1826	5,995
3	46	18.33	0,00196	419	1,731
4	40	18.33	-	390	-
5	- 5	3.53	0,3464	390	1,716
6	- 5	3.53	0,3464	1453	5,676

IV.3.1 Calcul des performances thermodynamiques :

- **Débit d'eau glycolée q_{meg} :**

$$\Phi_0 = q_{meg} \times C_{PEG} \times (T_{EEG} - T_{SEG}) \quad \text{avec:}$$

q_{meg} : Débit massique d'eau glycolée [kg/s].

Φ₀ : puissance frigorifique désirée [kW].

$$\Phi_0 = 30.7 \times 4.1855 \times 5 = 642,47 \text{ kW}$$

T_{SEG} : Température de sortie de l'eau.

T_{EEG} : Température d'entre de l'eau.

C_{PEG} : capacité calorifique de l'eau (C_{PEG} = 3,607 kJ/kg °C. [22])

$$(T_{EEG} - T_{SEG}) = 5 \text{ °C} \quad \text{Donc:}$$

$$q_{meg} = \frac{\Phi_0}{C_{PEG} \times (T_{EEG} - T_{SEG})} = \frac{642,47}{3,607 \times 5}$$

$$q_{meg} = 35,62 \text{ kg/s}$$

- **Débit d'ammoniac :**

$$q_{meg} \times C_{PEG} \times (T_{EEG} - T_{SEG}) = q_{R717} \times (h_6 - h_5), \quad \text{avec :}$$

q_{R717}: débit d'ammoniac,

h₆ : enthalpie massique du point 6, h₆ = 1453 kJ/kg

h₅ : enthalpie massique du point 5, h₅ = 390 kJ/kg

$$q_{mNH_3} = \frac{q_{meg} \times C_{PEG} \times (T_{EEG} - T_{SEG})}{h_6 - h_5} = \frac{35,62 \times 3,607 \times 5}{1453 - 390}$$

$$q_m = 0,60 \text{ kg/s}$$

- **Taux de compression τ :**

$$\tau = \frac{P_K}{P_0} = \frac{18,33}{3,53}$$

$$\tau = 5,19$$

- **Le rendement volumétrique du compresseur η_v :**

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times \tau$$

$$\eta_v = 0,74$$

- **Le rendement indiqué (η_i) :**

$$\eta_i \cong \eta_v$$

$$\eta_i = 0,74$$

- **Le rendement mécanique (η_m) :**

$$\eta_m = 0,86$$

- **Le rendement effectif (η_{eff}) :**

$$\eta_{eff} = \eta_i \cdot \eta_m = 0,74 \cdot 0,86$$

$$\eta_{eff} = 0,59$$

- **Calcul de h_{2r} :**

$$\eta_i = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \Rightarrow h_{2r} = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_i}$$

$$h_{2r} = 1482 + \frac{1737 - 1482}{0,74} \Rightarrow h_{2r} = 1826,59 \text{ kJ/kg}$$

- **Puissance théorique absorbée par le compresseur :**

$$P_{thcp} = q_m \times (h_{2s} - h_1) \quad \text{avec:}$$

$$h_1: \text{enthalpie du point 1} \quad h_1 = 1482 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s}: \text{enthalpie du point 2} \quad h_{2s} = 1737 \text{ kJ/kg}$$

w_{thcp} : le travail théorique absorbée par le compresseur

P_{thcp} : puissance théorique absorbée par le compresseur

$$W_{thcp} = (h_{2s} - h_1)$$

$$W_{thcp} = (1737 - 1482)$$

$$W_{thcp} = 255 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{thcp} = 0,60 \times (1737 - 1482)$$

$$P_{thcp} = 153 \text{ kW}$$

- **Le travail effectif du compresseur (w_{eff}) :**

$$w_{eff} = \frac{W_{th}}{\eta_{eff}}$$

$$w_{eff} = \frac{255}{0,59}$$

$$W_{eff} = 432,20 \text{ kJ/kg}$$

- **La puissance effective du compresseur (P_{eff}) :**

$$P_{eff} = qm \cdot W_{eff} = 0,60 \cdot 432,20$$

$$P_{eff} = 259,32 \text{ kW}$$

- **Puissance du moteur électrique**

$$P_{elec} = 1,2 \times P_{eff}$$

$$P_{elec} = 1,2 \times 259,32$$

$$P_{elec} = 311,18 \text{ kW}$$

- **Chaleur et puissance cédée au condenseur Φ_k :**

- Quantité de chaleur (Q_k) :

$$Q_k = h_{2r\acute{e}el} - h_4$$

$$Q_k = 1826 - 390$$

$$Q_k = 1436,59 \text{ kJ/kg}$$

- **Puissance cédée au condenseur Q_k :**

$$Q_k = qm \times (h_{2r\acute{e}el} - h_4)$$

$$Q_k = 0,60 \cdot 1436,59$$

$$\Phi_k = 861,95 \text{ kW}$$

- **Calcul du coefficient de performance COP :**

$$COP = \frac{\Phi_0}{P_{eff}} = \frac{642,47}{259,32} = 2,47$$

IV.3.2 Dimensionnement des canalisations:

➤ **Canalisation de refoulement:**

$$q_{VR} = V''_2 \times q_{mR717} = S_R \times W_R$$

$$\Rightarrow S_R = \frac{V''_2 \times q_{mR717}}{W_R} \quad [21]$$

Avec :

q_{mR717} : débit volumique du compresseur au refoulement.

V''_2 : volume massique du R717 au point 2 et $V''_2 = 0,10089 \text{ m}^3/\text{kg}$

S_R : section de conduit de refoulement

W_R : vitesse des vapeurs adoptées, elle est habituellement comprise entre 6 et 25 m/s

De vitesses allant de 10 à 18 m/s sont courantes [21]

On prendra $W_R = 11 \text{ m/s}$

$$S_R = \frac{0,10089 \times 0,60}{11}$$

$$S_R = 55,03 \text{ cm}^2$$

➤ **Canalisation d'aspiration :**

$$q_{VA} = V''_1 \times q_{mR717} = S_A \times W_A \Rightarrow S_R = \frac{V''_1 \times q_{mR717}}{W_A} \quad \text{avec :}$$

q_{VA} : débit volumique des vapeurs à l'aspiration du compresseur.

V''_1 : volume massique du R717 au point 1 et $V''_1 = 0,3644 \text{ m}^3/\text{kg}$

S_R : section de conduite de refoulement.

W_R : vitesse des vapeurs aspirées, elle est de même ordre de grandeur que du refoulement, 6 et 20 m/s (on adopte fréquemment des vitesses allant de 10 à 15 m/s) [21].

On prendra $W_R = 13 \text{ m/s}$ comme pour les conduites de refoulement.

$$S_A = \frac{0,3644 \times 0,60}{13}$$

$$S_A = 168,18 \text{ cm}^2$$

➤ **Canalisation du liquide frigorigène :**

$$q_{VL} = V''_3 \times q_{mR717} = S_L \times W_L \Rightarrow S_L = \frac{V''_3 \times q_{mR717}}{W_L} \quad \text{avec:}$$

q_{V1} : débit volumique frigorigène liquide en circulation.

V'_4 : volume massique du R717 au point 3 et $V''_3=0.00196 \text{ m}^3/\text{kg}$

S_L : section de conduite du liquide circulant.

W_L : vitesse du frigorigène liquide, afin de réduire les chutes de pression et évité ainsi l'ébullition du liquide frigorigène avant le détendeur on adopte des vitesses comprises entre 0,5m/s à 1m/s

On prendra $W_L=1\text{m/s}$

$$S_L = \frac{0,00196 \times 0,60}{1} \Rightarrow S_L = 11,76 \text{ cm}^2$$

Conclusion :

- On peut voir que l'ammoniac est le seul fluide frigorigène qui est toxique et dangereux pour l'homme Par contre, il n'a pas d'influence sur la couche d'ozone et surtout il n'est pas à effet de serre ce qui n'est pas le cas du R 134a.
- La température de refoulement de R134a faible qui nécessite pas d'utiliser un système de refroidissement.
- Son alliages de plomb de zine et d'aluminium par contre l'ammoniac incompatible avec le cuivre et alliages.
- Le choix du fluide frigorigène est très important dans une installation frigorifique, là on peut constater que l'utilisation de ce dernier repose sur quelques critères.
- Eléments de comparaison de R134a et l'ammoniac :

❖ Critères thermodynamiques :

- Température d'ébullition pour le R134a est ($-26.1 \text{ }^0\text{C}$), et pour R717 est ($-33,33^0\text{C}$).
- Température critique : pour le R134a est ($132,25 \text{ }^0\text{C}$), pour R717 est ($101,1^0\text{C}$).
- Température de refoulement : (60^0C) pour R134a et pour R717 c'est (80^0C).
- Taux de compression : $\tau=4,93$ pour R134a et pour R717 $\tau=5,19$.

❖ Sécurité et environnement :

- Groupe de sécurité : pour R134a A₁ (faiblement toxique et faiblement inflammable par contre pour R717 B₂ (fortement toxique et moyennement inflammable).
- ODP : R134 et R717 égale à 0.
- GWP : 1300 pour R134a et 0 pour R717.

❖ Economique :

- Débit de massique (kg/s) : $q_{m_{134a}}=4,62$ kg/s et $q_{m_{717}}= 0,6$ kg/s
- Dimensions des canalisations :
 - **SA** : R134a=307,05 cm², R717=168,18 cm²
 - **SR** : R137a=77,28 cm², R717=55,03 cm²
 - **SL** : R134a=41,21 cm², R717=11,76 cm²

❖ Techniques :

- Action sur les métaux : Pour R134a alliages de plomb de zine et d'aluminium, par contre le R717 est incompatible avec le cuivre et alliages.

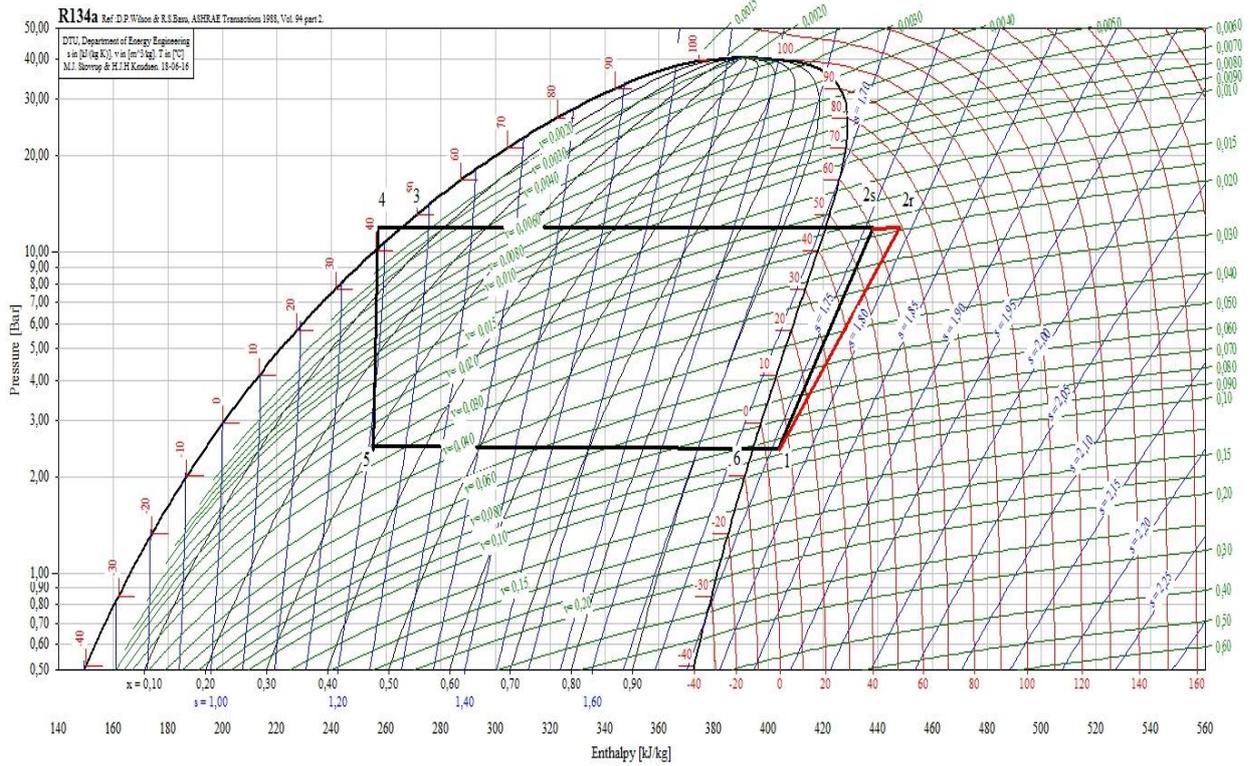


Figure.IV.2 : Tracé du cycle du R-134a sur le diagramme ln (P) - h

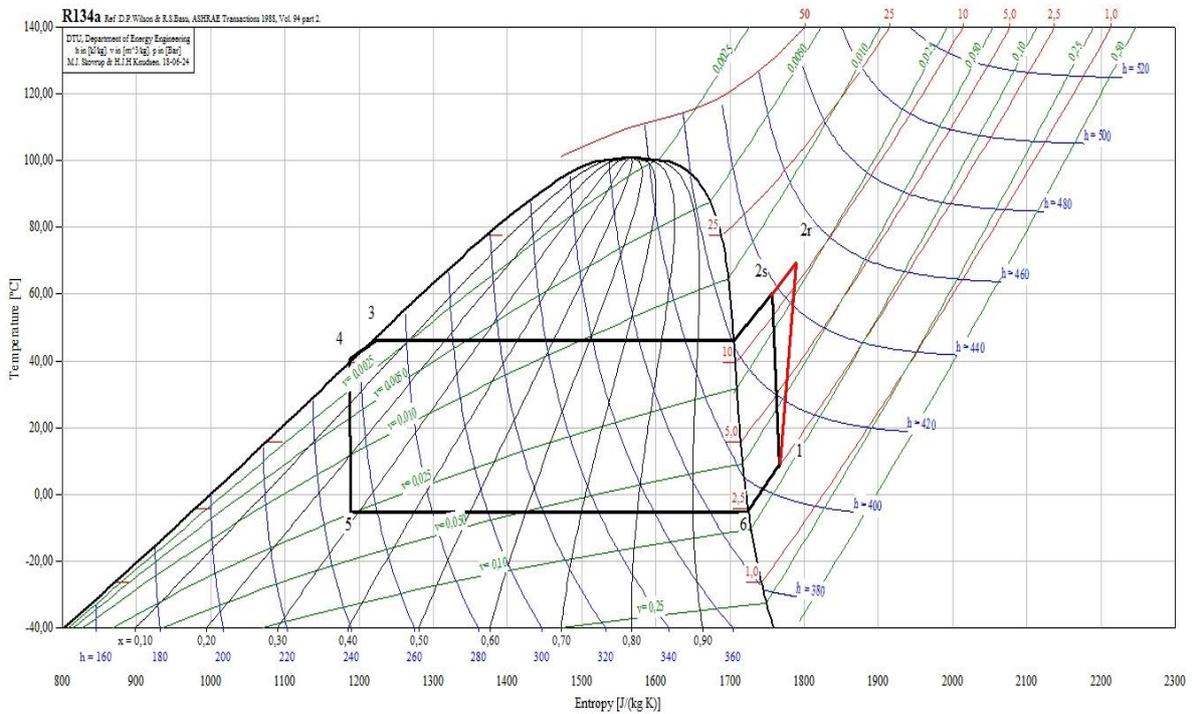


Figure.IV.3 : Tracé du cycle du R-134a sur le diagramme T – S

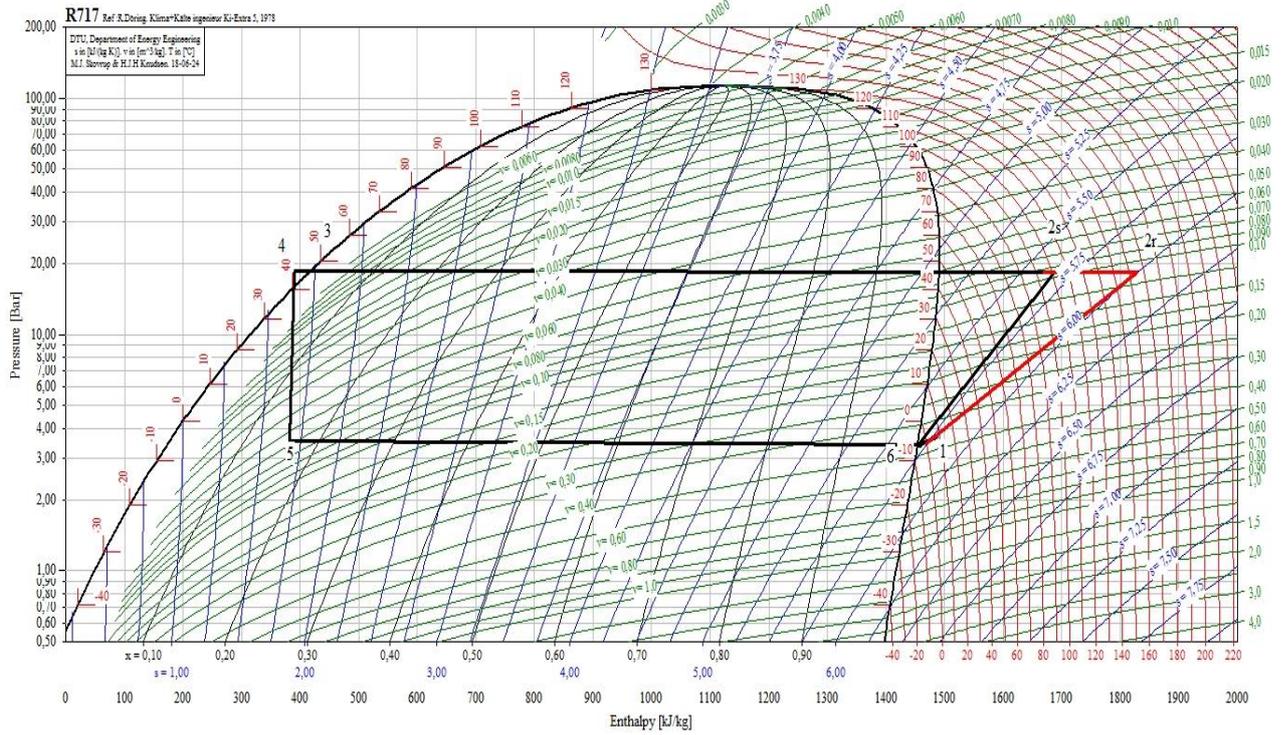


Figure.IV.4 : Tracé du cycle du R717 sur le diagramme ln (P) – h

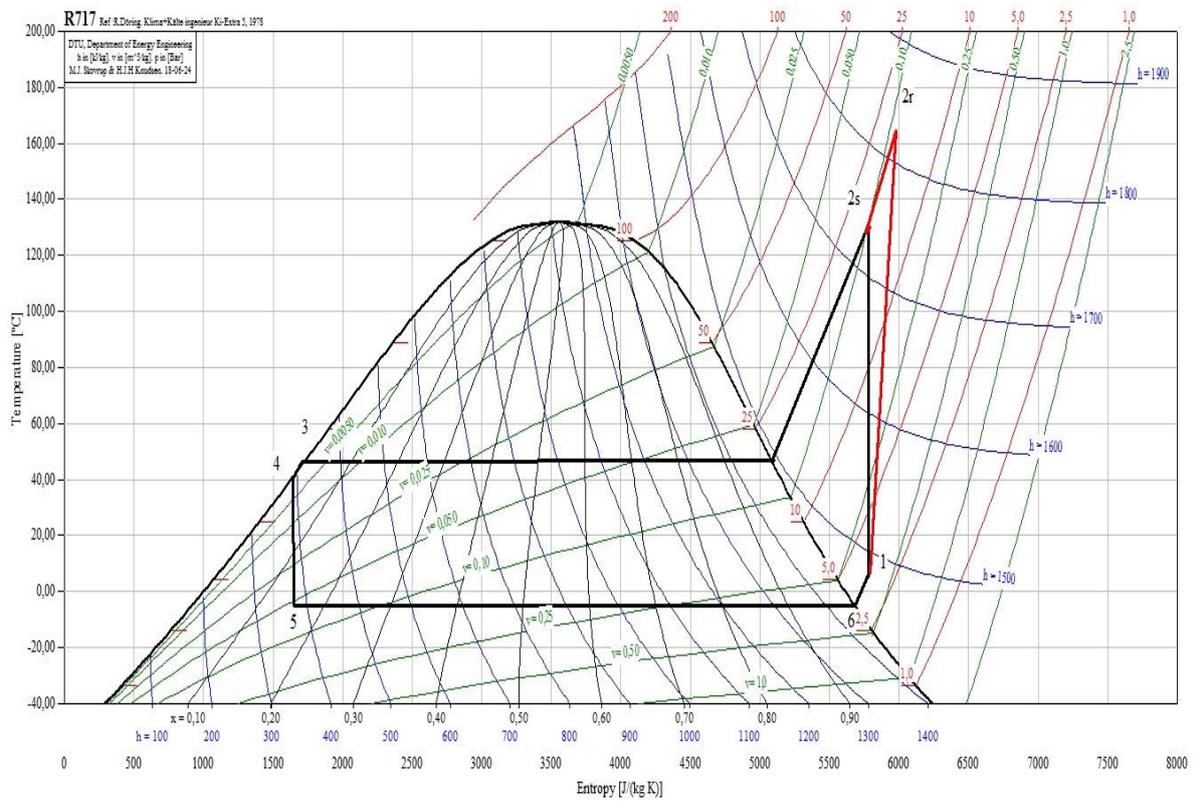


Figure.IV.5 : Tracé du cycle du R717 sur le diagramme T – S

IV.4 : Caractéristique de l'échangeur eau glacée / Sucre liquide :

Tableau IV.4 : Paramètres de fonctionnement de l'échangeur

Fluide	Sucre liquide	Eau froide
Débit massique (kg / s)	20,27	11,11
Température d'entrée (°C)	$T_{ce} = 40$	$T_{fe} = 8$
Température de sortie (°C)	$T_{cs} = 25$	$T_{fs} = 13$

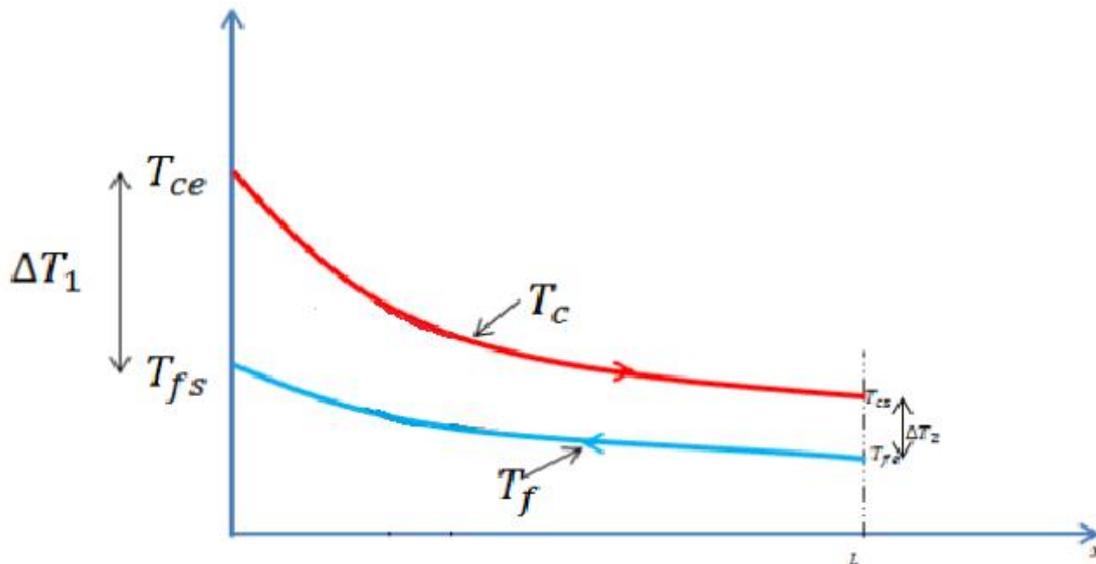


Figure.IV.6 : Evolution de température dans un échangeur à contre-courant

- La puissance de cette échangeur :

$$\begin{aligned}\Phi &= (\dot{m} \text{ cp}) (\Delta T) \\ &= (\dot{m} \text{ cp}) (T_{fs} - T_{fe})\end{aligned}$$

A N :

$$\Phi = 20,27 \times 4180 \times (13 - 8)$$

$$\Phi = 423,643 \text{ kW}$$

- En déterminer ΔT_{LM} :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{cs} - T_{fe}) - (T_{ce} - T_{fs})}{\ln(T_{cs} - T_{fe}) - \ln(T_{ce} - T_{fs})}$$

AN :

$$\Delta T_{LM} = \frac{(25 - 8) - (40 - 13)}{\ln(25 - 8) - \ln(40 - 13)}$$

$$\Delta T_{LM} = 21,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- A partir de la surface on déduit le coefficient global d'échange moyen

$$\bar{h} = \frac{\Phi}{S \Delta T_{LM}}$$

AN :

$$\bar{h} = \frac{423,643}{22,8 \times 21,62}$$

$$\bar{h} = 0,86 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

- Calcule de l'efficacité :

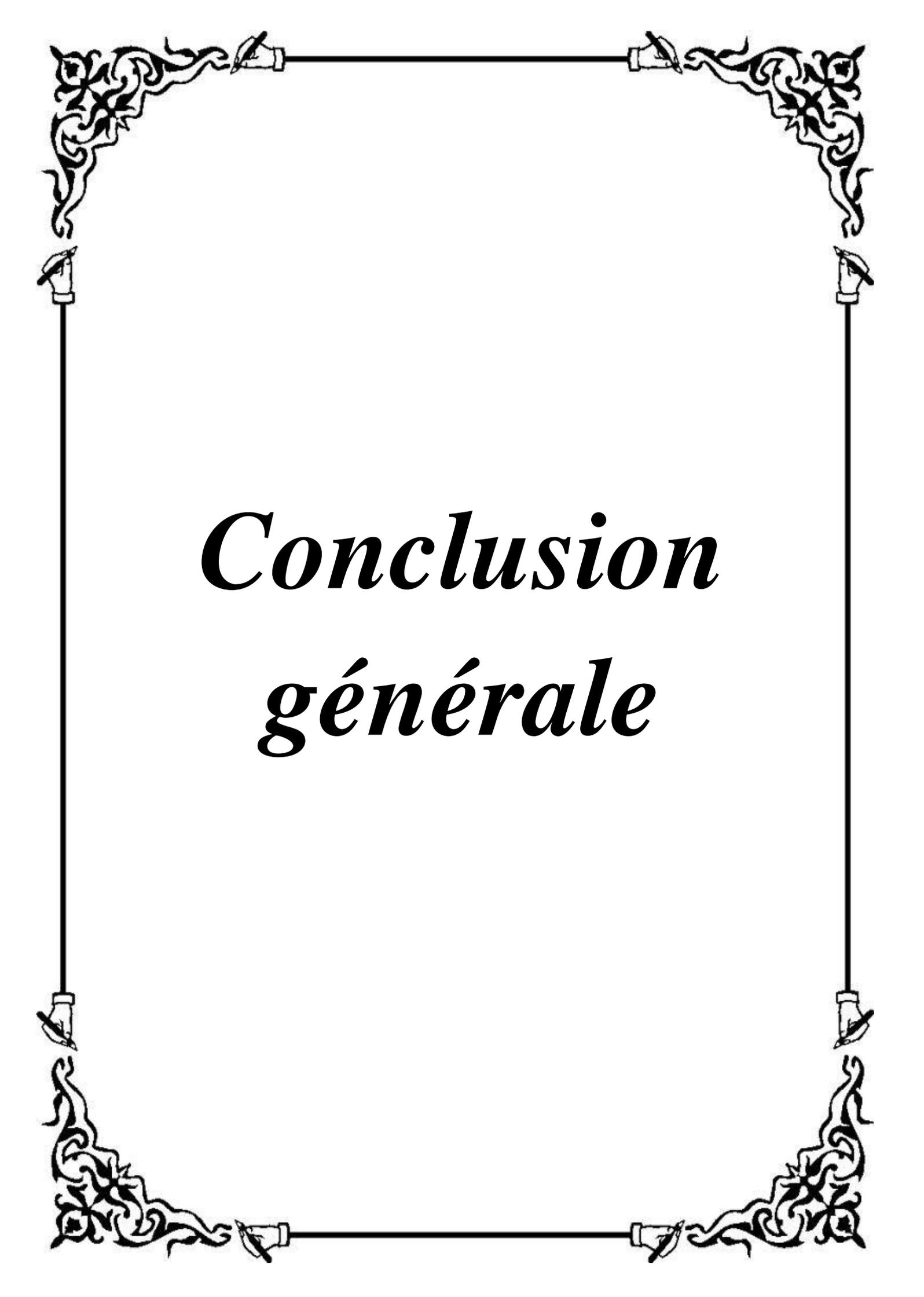
$$\varepsilon = \frac{\phi}{\phi_{\max}} = \frac{(\dot{m} \text{ cp}) (\Delta T_2)}{(\dot{m} \text{ cp}) (\Delta T_1)}$$

$$\varepsilon = \frac{(T_{cs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fs})}$$

A N :

$$\varepsilon = \frac{(25 - 8)}{(40 - 13)} = \frac{17}{27}$$

$$\varepsilon = 0,6296$$

A decorative rectangular border surrounds the text. It features four ornate floral corner pieces and four quill pen motifs, one on each side of the border.

Conclusion générale

Au cours de notre stage effectué au sien de l'entreprise **Cevital**, nous avons été amenés à traiter un sujet portant sur le dimensionnement d'un groupe frigorifique fonctionnant au R134a est destiné au stockage du sucre liquide.

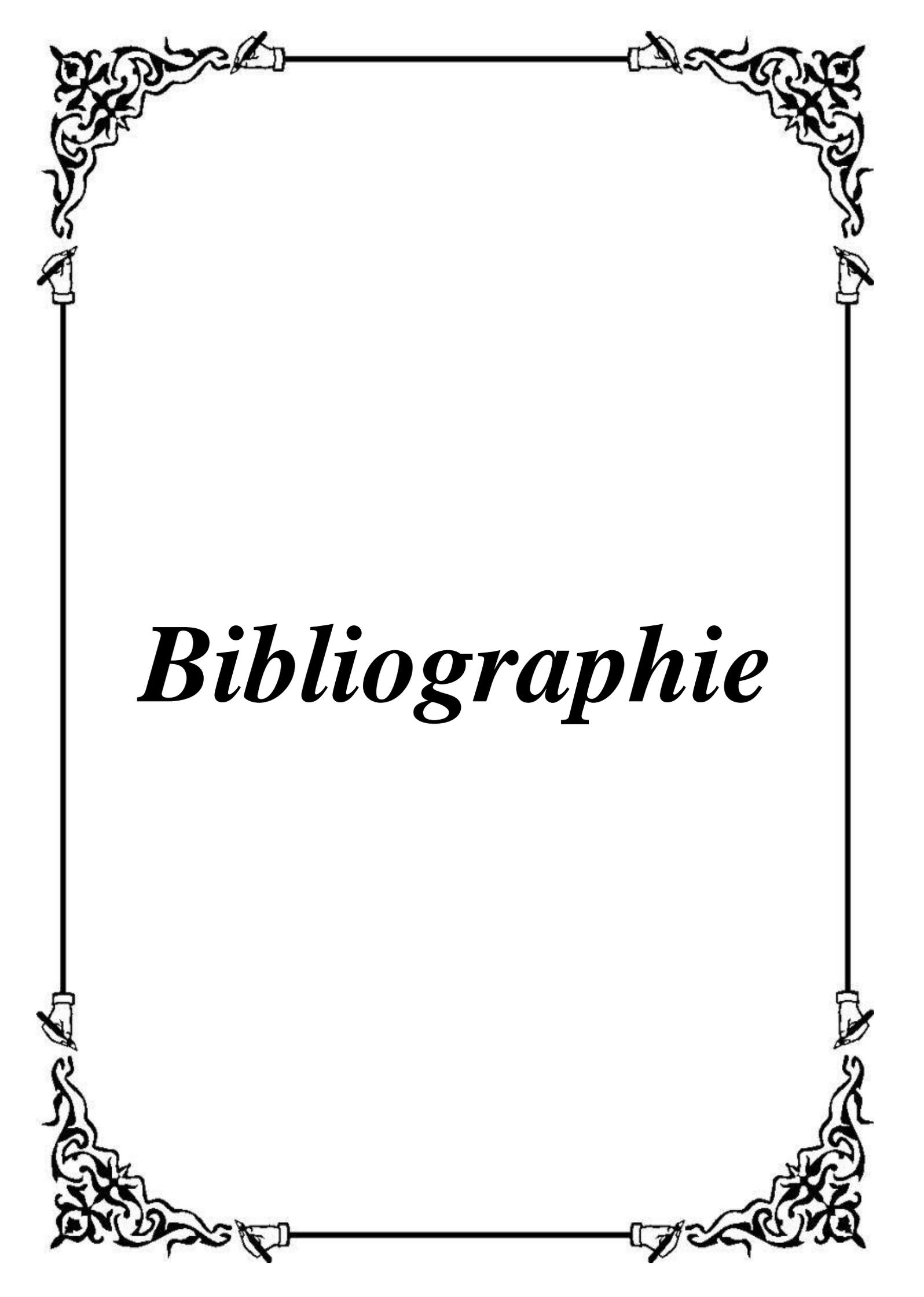
Après avoir menée des études sur les machines frigorifique et aussi sur les fluides frigorigènes opérant au sien de ces machines, en mettant en relief les avantages et les inconvénients de chacun de ces fluides, nous avons été amenés à effectuer un dimensionnement énergétique du groupe frigorifique ceci en y développant une analyse thermodynamique.

Dans le but de voir le comportement du groupe avec un autre fluide frigorifique, nous avons évalué ses performances thermodynamiques avec le fluide frigorigène ammoniac.

A l'issue de cette étude nous avons mené une analyse comparative des performances avec ces deux fluides R134a et ammoniac.

Enfin nous achevons les aspects techniques du présent travail avec quelques calculs élémentaires concernant l'échangeur de chaleur à plaques destiné à refroidir le sucre liquide à la moyenne de l'eau glacée produite par le groupe étudié.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail puisse être bénéfique aux futures promotions d'étudiants à venir mais surtout à l'entreprise **Cevital** qui a bien voulu nous offrir l'opportunité de le réaliser.

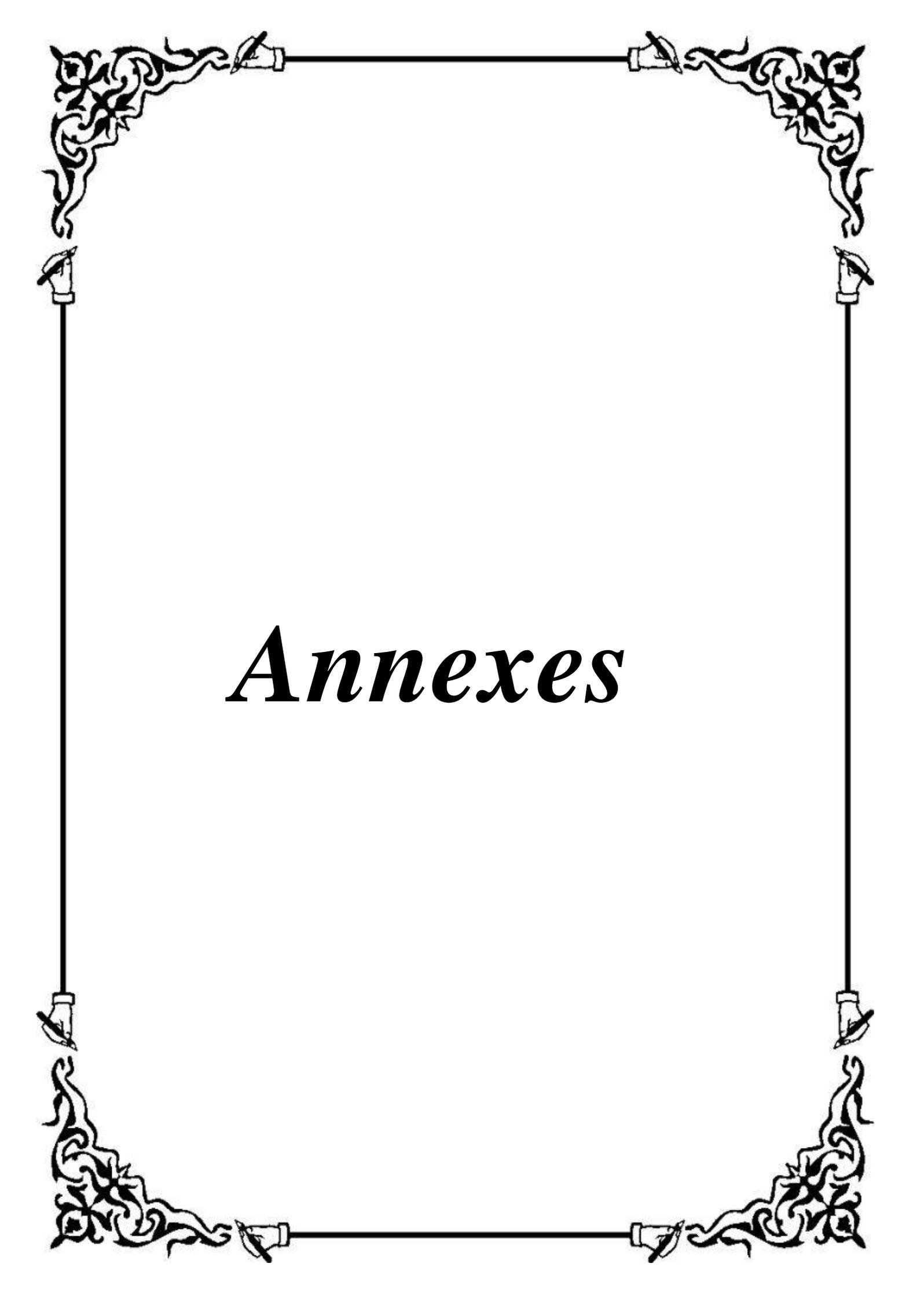
A decorative rectangular border surrounds the page. The corners are adorned with intricate floral and scrollwork designs. Small quill pen icons are placed at the midpoints of each side of the border, where they meet the lines.

Bibliographie

Bibliographie

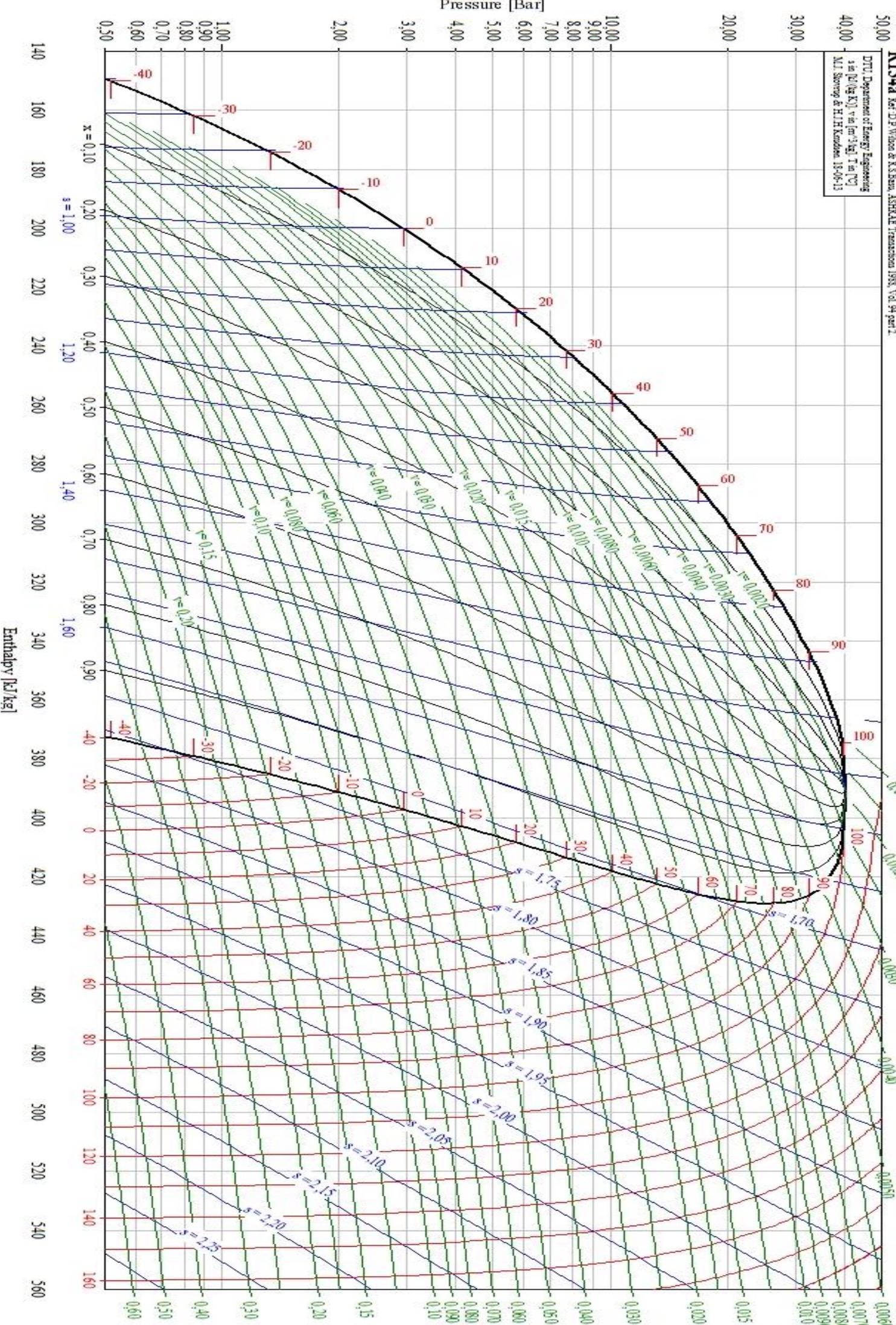
[1]	Mathlouthi, M. R.M.C, Barbara, B. l'extraction du sucre. CEDUS : centre d'étude et de Documentation du sucre, (2001)
[2]	Decloux, M. procédés de transformation en sucrerie. Technique de l'ingénieur. Paris, 21 P, (2003).
[3]	Burzawa, rappel des bases de l'épuration calcio -carbonique .Association AVH, 6 ^{eme} Symposium, Reims, 9 P, (1999).
[4]	N. RACHEDI, précédés de transformation dans la raffinerie de <i>Ce vital</i> SPA Rapport de Formation, 17 P, (2002).2222
[5]	Lucien Borel, « thermodynamique et énergétique», Presses Polytechniques Romand, 1984.
[6]	. P.J. RAPIN et P. JACQUARD, Installations frigorifiques, Editions PYC et H. NOACK et R. SEIDEL, Pratique des installations frigorifiques, Editions PYC.
[7]	Olivier PERROT, « COURS DE MACHINES FRIGORIFIQUES», I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque, 2010-2011.
[8]	C. Shein et R. Radermacher, Scroll compressor simulation model. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 123 (2001).
[9]	Vrinat G. Production du froid. Technologie des machines industrielles. B 2 365, traité Génie énergétique, Techniques de l'Ingénieur, oct. 1991.
[10]	Maxime DUMINIL, « Cours de Production du Froid », E. C. Paris.
[11]	P. DALL ZOTTO, J. M .LARRE, A.MERLET, L.PICAU, « <i>MEMONTECH genie énergétique</i> », édition OUGHLA MEHDI, France 2000.
[12]	Hossein FALLAHSOHI, « Modélisation dynamique des échangeurs diphasiques appliquée aux groupes frigorifiques contrôlés par une commande avancée », thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. 2011.
[13]	. Armstrong Air Conditioning Inc., Amana Company L.P, Bard Mfg Co, www.amana.com ; www.aac-inc.com ; www.bardhvac.com
[14]	site web, les composants d'une pompe à chaleur
[15]	Yvan Fayolle, Ste Clauger, << les fluides frigorigènes >> support n ^o 2, de février2002.
[16]	Site web, technique du froid, cours de base
[17]	P.J. Rapin, P. Jaccard, << installation frigorifique>>, édition PYC, 1996, Tome I, pages 275,276.
[18]	Pierre Rapin et Patrick jacquard, Aide-mémoire formulaire du froid 13 ^{ème} édition juin 2006
[19]	Francis Meunier, Paul Rives, Marie France Terrier, << Froid Industriel>> édition Dunod. 2005.
[20]	Institut International du Froid « Propriétés thermodynamiques des frigorigènes : R134a ».

[21]	Duminil Maxime, << Théorie des Machines Frigorifiques, Machine à Compression Mécaniques >>, Techniques de l'ingénieur b-9 730,1996
[22]	Mémoire de fin d'Etude, Azzoug Mounir et Zeggagh Ahcene, << Etude d'une Installation Frigorifique à Ammoniac du Complexe Danone Djurdjura Algerie SPA

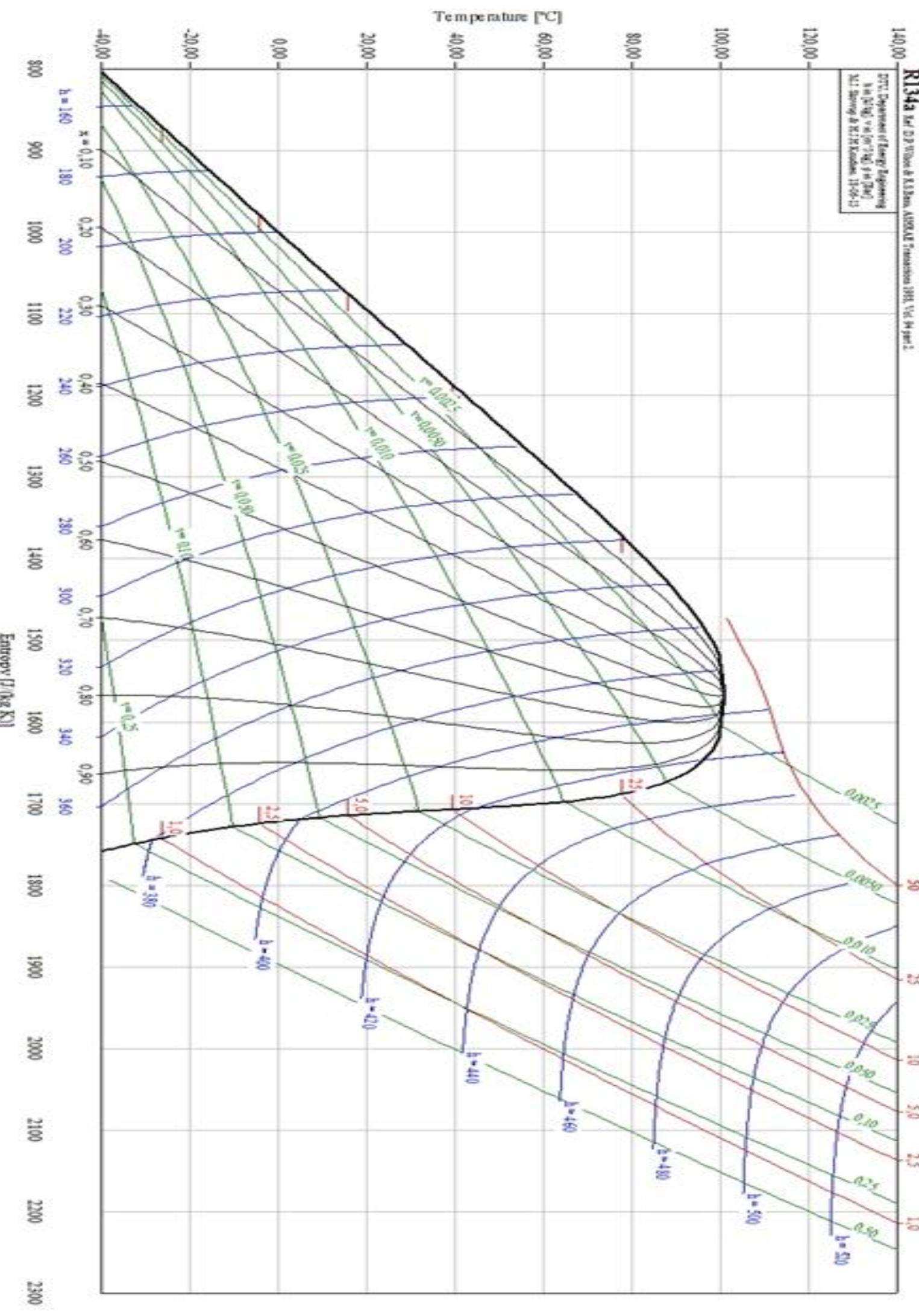


Annexes

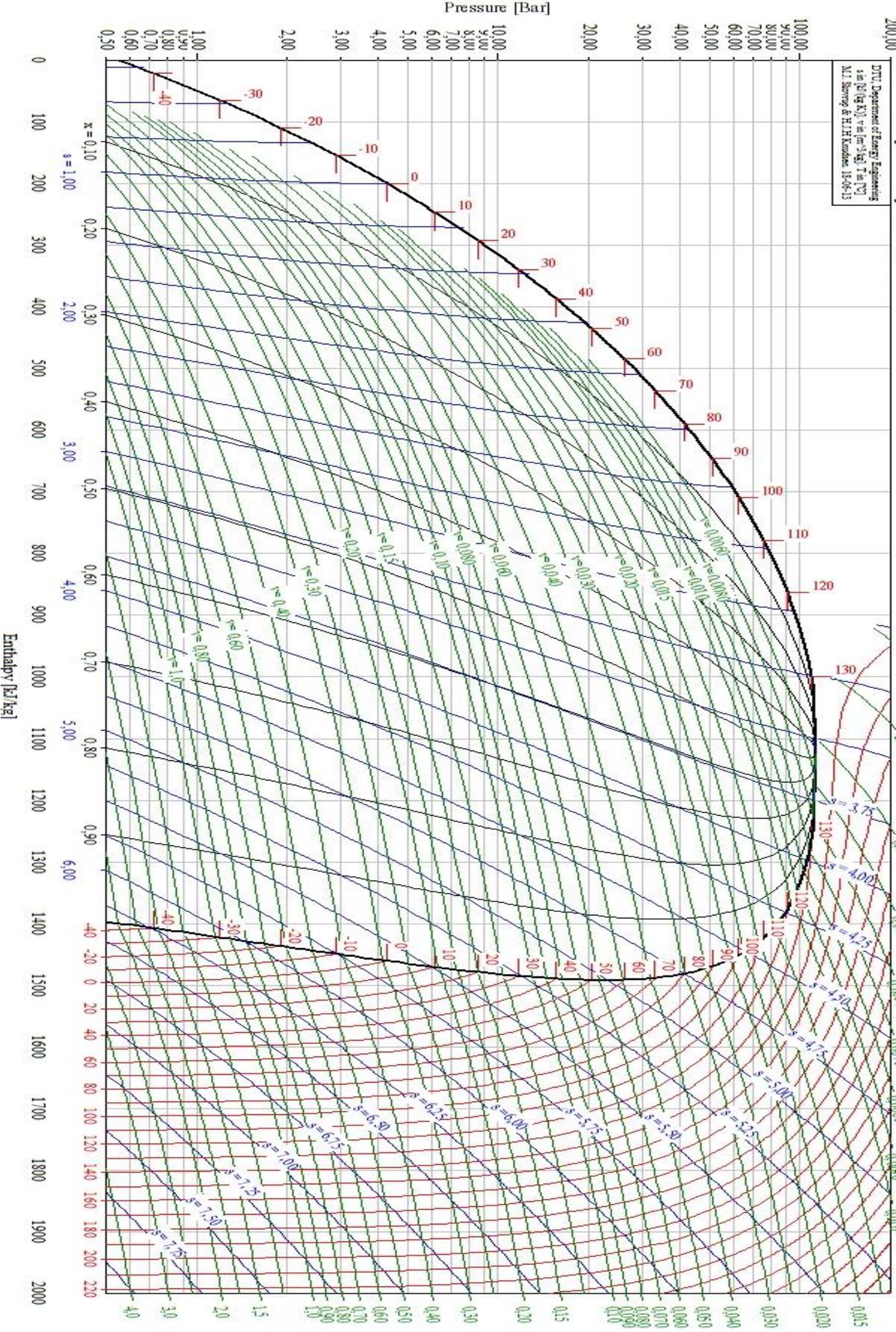
DTU, Department of Energy Engineering
s in (kJ/kg K), v in (m³/kg), T in (°C)
M.I. Støring & H.H. Knudsen, 18-06-13



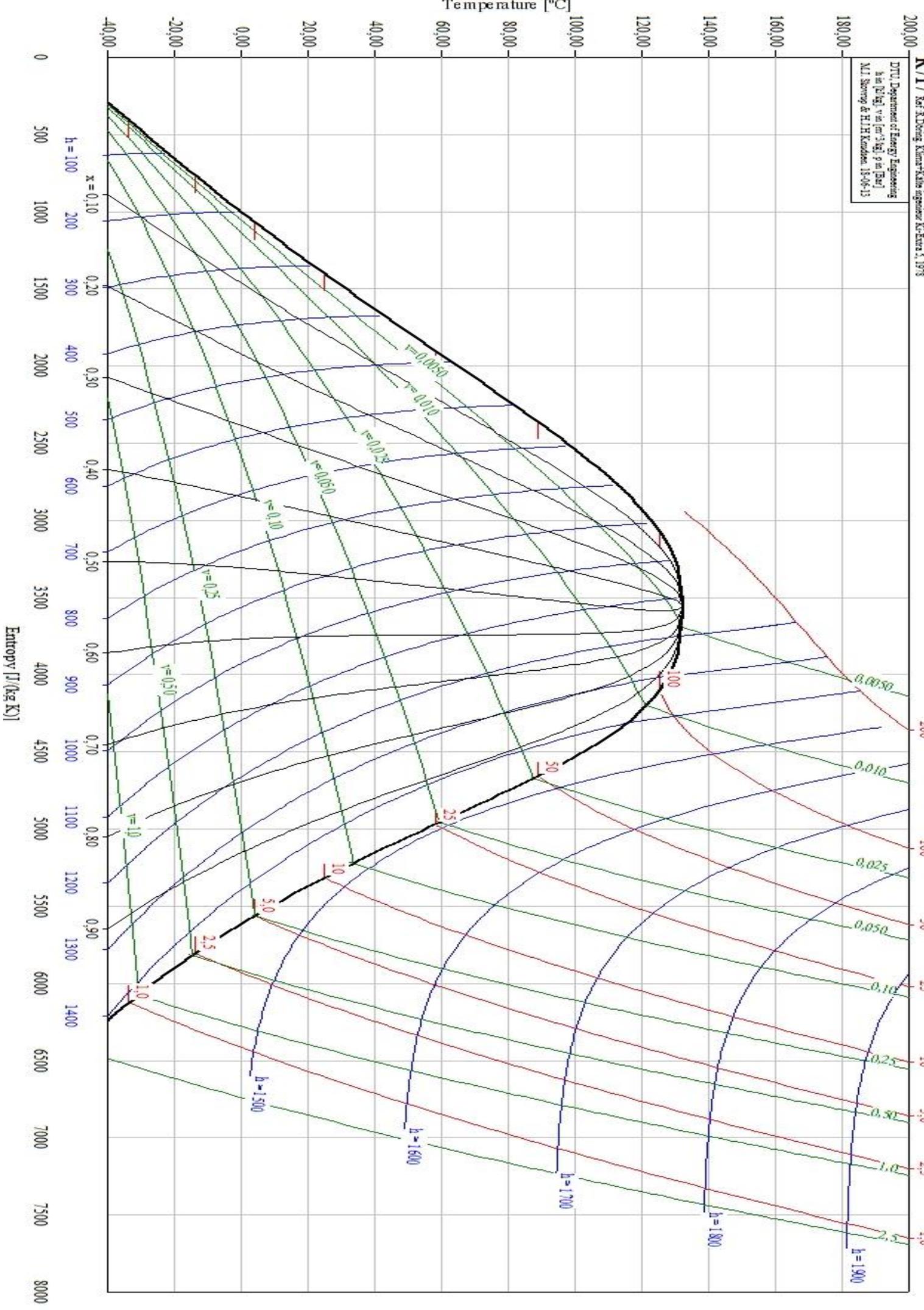
DTU, Department of Energy Engineering
h in [kJ/kg], v in [m³/kg], p in [bar]
x, z, D, D_h in [mm], K in [K], Re in [-]



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



DTU, Department of Energy Engineering
h in [kJ/kg], v in [m³/kg], p in [bar]
M.L. Steenoy & H.J.H. Knudsen, 15-04-13



No. de section	1		
désignation de section	refroidisseur à basse température		
No du médium	1	2	
désignation	Produit	Glycol de propyl.	
température entrée	40 °C	8 °C	
température sortie	25 °C	13 °C	
débit	40000 kg/h	73000 l/h	
volume	40,3 l	41,5 l	
nombre de plaques	68		
groupage de plaques	1x33H	1x34H	
surface d'échange	22,8 m ²		
capacité	419,11 kW		
perte de charge	2,4 bar	0,6 bar	
épaisseur de plaques	0,7 mm		
matériel de plaques	1.4404		
support de plaques	Non		
genre de plaques	M		
matériel de joint	EPDM	EPDM	
fixation de joint	mécanique	mécanique	
temp. max. de service	110 °C		
surpress. max. de service	10 bar	10 bar	
surpression d'épreuve	12,5 bar	12,5 bar	
genre de raccord	2501 / 2501	2501 / 2501	
raccord DN	80 / 80	80 / 80	
matériel de raccord	1.4571 / 1.4571	1.4571 / 1.4571	

Résumé :

L'objectif du présent travail est le dimensionnement d'un groupe frigorifique fonctionnant au R134a destiné au stockage du sucre liquide. Le dimensionnement consiste à évaluer les performances énergétiques du groupe pour refroidir un débit d'eau glacée représentant la charge de l'installation. Une étude comparative entre le fonctionnement au R134a et à l'ammoniac a été menée. Enfin un résumé des caractéristiques de l'échangeur à plaques, lieu d'échange de chaleur entre le sucre liquide et l'eau glacée est présenté à la fin de ce mémoire.

Abstract:

The objective of this work is the sizing of a refrigerating unit operating with R134a for the storage of liquid sugar. Sizing consists of evaluating the energy performance of the unit to cool a flow of chilled water representing the load of the installation. A comparative study between R134a and ammonia operation was conducted. Finally a summary of the characteristics of the plate heat exchanger, place of heat exchange between the liquid sugar and the icy water is presented at the end of this paper.