

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



UNIVERSITÉ 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 :

KHOULALENE Nawfel

BELDJOUDI Koussaila

Thème

**« Dimensionnement d'une installation frigorifique de production
et de stockage de la margarine » CO GB La belle bejaia**

Soutenu le 07 / 07 /2019 devant le jury composé de :

Mr.ALI AGHA.H

Président

Mr. DJERRADA.A

Rapporteur

Mr. BENSLIMANE.A

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

Remerciements

*En premier lieu, on remercie Dieu tout puissant de nous
avoir aidés*

pour arriver à terme de ce travail.

On tient à remercier nos familles,

*On tient à remercier vivement notre encadreur Mr
DJERRADA.A*

*pour sa disponibilité et son aide tout au long de ce
travail.*

*On tient à remercier tous nos collègues et tous les
enseignants du*

département génie mécanique.

*On tient à exprimer nos remerciements à toutes les
personnes qui*

nous ont aidés dans l'accomplissement de ce projet.

*Que Monsieur le Président et Messieurs les membres
du jury*

*trouvent ici l'expression de notre gratitude pour avoir
accepté*

d'examiner et de juger ce modeste travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail:

- ✚ A mes chers parents, c'est grâce à leurs sacrifices et leur patience, qui m'ont permis de réaliser mes ambitions et atteindre mes objectifs.*
- ✚ A mes chers frères.*
- ✚ A mes chères sœurs*
- ✚ A tous les membres de ma grande famille.*
- ✚ A MENSIER KAWLAS ET BRIKH*
- ✚ A mes amis et tous ceux qui m'ont assisté et soutenu dans mes études.*

Dédicace

JE DÉDIER CE MODESTE TRAVAIL :

✚ *A mes parents qui m'ont soutenu et aidé tout au long de ma vie. Que dieu les bénisse. À mes frères et sœurs qui m'ont toujours aidé, yacine ,nadjib ,abderrahmane ,massinissa , nabil ,walid ,nanou ,karima fouzia et ses deux fils abdellah et amel*

✚ *A MENSIEUR KAWLAS ET BRIKH*

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

Nawfel

Figure I.1 : Installation frigorifique à ammoniac.....	6
Figure II.2 : Conservation des produits médicaux.	7
Figure II.3 : Conservation des aliments.	8
Figure II.4 : Conservation des produits chimiques.....	8
Figure II.5 : Machine à compression mécanique.....	10
Figure II.6 : Machine à gaz froid.	11
Figure II.7 : Machine a absorption.	12
Figure II.8 : Machine thermoélectrique	13
Figure II.9 : Machine de froid à vortex.....	14
Figure II.10 : Types de compresseurs.....	14
Figure II.11 : Constitution du détendeur thermostatique à égalisation de pression externe...	19
Figure II.12 : Cycle idéal de Carnot (cycle de référence).....	20
Figure II.13 : Diagramme T-S d'un mélange liquide-vapeur.	21
Figure II.14 : Diagramme de Mollier (h, s).	21
Figure II.15 : Diagramme des frigoristes.....	22
Figure II.16 : Courbes isoparamétriques	23
Figure II.17 : Évolution d'un frigorigène sur un diagramme enthalpique.....	23
Figure IV.18 : Diagramme entropique de la machine frigorifique.	40
Figure IV.19 : Diagramme enthalpique de la machine frigorifique.....	41
Figure IV.20 : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple.	41
Figure IV.21 : Cycle (P-H) thermodynamique de l'installation frigorifique avec R717.....	48
Figure IV.22 : Cycle(T-S) thermodynamique de l'installation frigorifique avec R717.	49
Figure V.23 : Estimation du nombre de renouvellement d'air en fonction du volume de la chambre froide.....	52
Figure V.24 : Géométrie de la chambre froide	55
Figure V.25 : Machine à compression de vapeur formée de quatre éléments de base.....	60
Figure V.26 : Variation du rendement volumétrique η_v en fonction de taux de compression $\tau[5]$	65
Figure V.27 : Tracer du cycle de la chambre froide sur le diagramme des frigoristes (P-H)..	67
Figure V.29 : Tracer du cycle de la chambre froide sur le diagramme des frigoristes (T-S) ..	68

Tableau III.1 :Quelques fluides de famille de CFC.	29
Tableau III.2 :Quelques fluides de famille HCFC.	29
Tableau III.3 :Quelques fluides de famille HFC.	30
Tableau III.4 : Classification de quelques fluides frigorigènes en fonction de leur toxicité et leur inflammabilité	31
Tableau III.5 : Description d'autres fluides frigorigène utilisés dans le froid.	33
Tableau III.6 : Groupes des sécurités pour les fluides frigorigènes.	36
Tableau III.7 : Classement quelque fluide frigorigène.....	36
Tableau III.8 : Propriétés chimiques et physiques de l'ammoniac.	38
Tableau III.9 :Propriétés chimiques et physiques de R22.....	39
Tableau IV.10 : Coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R717.....	42
Tableau V.11 :Apport calorifique des travailleurs.....	53
Tableau V.12 :Conductivité thermique et épaisseur de chaque matériau utilisé	56
Tableau V.13 :Résistances superficielles des parois.....	56
Tableau V.14 :Coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R 22	61

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralité sur l'entreprise

Introduction	3
I.1.Présentation de l'entreprise CO.G.B LA Belle	3
I.2.Historique	3
I.3.Situation géographique	4
I.4.Moyens de l'entreprise	4
I.5.Département production	4
I.6. Unité de margarinerie	5
I.7.Schémas de l'installation de frigorifique à ammoniac (R-7017)	6

CHAPITRE II : Généralités sur les machines frigorifiques

II.1. La production de froid	7
II.2. Bref historique de la production de froid	7
II.3. Domaines d'utilisation du froid.....	7
II.4. Différents principes de production du froid	9
II.4.1. Différents modes de la production du froid	9
II.4.2. Installation frigorifique a compression	9
II.4.3. Installation frigorifique a gaz froid	10
II.4.4. Installation frigorifique a absorption	11
II.4.5. Installation frigorifique thermoélectrique	12
II.4.6. Générateur de froid a vortex	13
II.5. Différents éléments d'une installation frigorifique.....	14
II.5.1. Compresseur	14
II.5.2. Condenseur	16
II.5.3. Evaporateur	17

II.5.4. Détendeur	18
II.5.4.1. Détendeurs les plus utilisés sont.....	19
II.6. Thermodynamique de froid	20
II.6.1. Cycle frigorifique de Carnot	20
II.6.2. Diagramme thermodynamiques	20
II.6.2.1. Le diagramme entropique (T, s) :.....	21
II.6.2.2. Le diagramme de Mollier (h, s).....	21
II.6.2.3. Le diagramme (h, ln P), dit « diagramme des frigoristes ».....	22
II.6.2.4. Diagramme enthalpique : propriétés Courbes isoparamétriques	23
II.6.3. Calcul des différentes performances frigorifiques	24

CHAPIRE III : Les fluides frigorigènes

III.1. Fluides frigorigènes	26
III.1.1. Définition.....	26
III.2. Propriétés des fluides frigorigènes	26
III.3. Différents types du fluide frigorigène.....	27
III.3.1. Composés inorganiques purs :	27
III.3.2. Composés organique purs.....	28
III.3.2.1. Types de composés organiques purs.....	28
III.3.2.1.1. Les hydrocarbures :	28
III.3.2.1.2. Les hydrocarbures halogènes	28
III.3.2.1.3. Les HCFC (Hydrochlorofluorocarbures)	29
III.3.2.1.4. Les HFC (Hydrofluorocarbures)	29
III.4. Mélanges organiques	30
III.5. Autres fluides	32
III.6. Nomenclature et les critères de choix.....	33

III.6.1. La nomenclature	33
III.6.3. Critères du choix.....	34
III.7. Impact des fluides frigorigène	36
III.7.2. Impact sur l'environnement.....	36
III.7.2.3. Indice d'impact :	36
III.7.2.4. Impact sur la santé et la sécurité	37
III.7.2.5. Impact sur le bilan énergétique	37
III.8. Propriétés chimiques et physiques de l'ammoniac	38
III.9. Propriétés chimiques et physiques de R22	39

CHAPITRE IV : Analyse thermodynamique

IV. Introduction	40
IV.1. Analyse thermodynamique.....	40
IV.2. Etude de l'installation frigorifique de la margarinerie.....	40
IV.2.1. Cycles d'une machine frigorifique à compression mécanique tracés dans les diagrammes entropique et enthalpique	40
IV.3. Présentation de l'installation à ammoniac.....	41
IV.4. régime de fonctionnement :	42
IV.5. Tracé du cycle sur le diagramme des frigorigènes	42
IV.6. Calcul des différents points de cycle (enthalpie et entropie) :	43
IV.7. Calcul des performances thermodynamiques	45

CHAPITRE V : Bilan thermique de la chambre froide

V.1. Bilan thermique de la chambre froide	50
V.2. Charges thermiques de la chambre froide.....	50
V.2.1. Charges thermiques externes	50
V.8. Calcul des charges thermiques de la chambre froide	55
V.8.1. Dimensions de la chambre froide	55

V.9.Calcul des charges thermiques	56
V.10.Étude thermodynamique de groupe frigorifique à R22	60
V.11.Calcul des différents points de cycle (enthalpie et entropie).....	61
V.12.Calcul thermodynamique	63
V.12.1. Puissance mécanique du compresseur	64
V.12.2. Puissance effective absorbée par le compresseur :	65
V.12.3. Le travail théorique.....	65
V.12.4. Puissance de moteur électrique.....	66
V.12.5. Chaleur et puissance cédée au condenseur	66
V.12.7. Coefficient de performance COP :	66
Discussion des resulas.....	66
Conclusion Générale	69

Bibliographie

Annexes

Nomenclature

Notions	Désignations	Unités
Cp	Chaleur massique à pression constante	(J/kg °C)
D	Diamètre	(m)
e	Epaisseur	(m)
h	Enthalpie massique	(J/kg)
H	Hauteur	(m)
h _e	Coefficient de transfert de chaleur par convection externe	(W/m ² °C)
h _i	Coefficient de transfert de chaleur par convection interne	(W/m ² °C)
h _s	Enthalpie spécifique	(J/kg air sec)
K	Coefficient global d'échange thermique	(W/m ² °C)
l	Largeur	(m)
L	Longueur	(m)
L _v	Chaleur latente de vaporisation	(J/kg)
m	Masse	(kg)
M	Masse molaire	(g/mol)
Nr	Nombre de renouvellement d'air	(vol/j)
P	Pression	(bar)
P	Puissance	(W)
Q	Chaleur massique	(J/kg)
q _m	Débit massique	(kg/s)
q _v	Débit voluméque	(m ³ /s)
τ	Taux de compression	-
R	Résistance thermique	(m ² °C/W)
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)
HP	Haute pression	(bar)

BP	Basse pression	(bar)
V_s	Volume spécifique	(m ³ / kg air sec)
W	Travail massique	(J/kg)
X	Titre en vapeur	(sans unité)
v''	Volume spécifique	[m ³ /kg]

Symboles grecs :

(η_{is})	Rendement isentropique de la compression	-
E	coefficient de performance	-
η_{eff}	Rendement effectif	-
η_i	Rendement indiqué	-
η_v	Rendement volumétrique	-
θ	Température	(°C)
λ	Conductivité thermique	(W/m °C)
P	Masse volumique	(kg/m ³)
Ψ	Humidité relative	(%)
Φ	Puissance thermique	(W)

Indices principaux :

indices	Significations
A	Air
As	Air sec
B	Branche
Cf	Chambre froide
D	Denrées
E	Externe
Ec	Eclairage
eff	Effectif (ve)
em	Emballage
f	Finale
fc	Fonctionnement

ff	Fluide frigorigène
i	Interne
in	Initiale
k	Condensation
n	Nominale
p	Parois
Pal	Palette
pl	Plancher
r	Réel
r,a	Renouvellement d'air
ref	Refoulement
s	Superficielle
sup	Supplémentaire
T	Totale
T	Travailleur
Th	Théorique
V	Ventilation

Introduction Générale

Fournir du froid à un corps, à un milieu, c'est lui extraire de la chaleur ce qui se traduit par un abaissement de sa température et aussi, bien souvent, par des changements d'états : condensation, solidification, etc.

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

Dans les pays à climat chaud, les pertes de denrées périssables peuvent être très importantes, ce qui d'un côté réduit les revenus des producteurs et d'un autre, entraîne à une augmentation de prix des produits sur le marché. Si la production alimentaire est insuffisante, les pertes aggravent la situation.

Le présent travail s'inscrit dans le domaine de l'agro-alimentaire et plus précisément dans la production et le stockage de la margarine.

Ce travail est consigné dans un mémoire à cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise CO-GB LA BELLE, sa situation géographique, ces secteurs d'activités, et enfin les procédés de fabrication de la margarine.
- Le deuxième chapitre est dédié à la production de froid et aux machines frigorifiques.
- Le troisième chapitre à La présentation des fluides frigorigènes, leurs types et leurs nomenclatures, leurs caractéristiques et les critères de choix.
- Le quatrième chapitre est destiné aux différents calculs thermodynamiques et aux performances de ces machines. Une étude du groupe frigorifique de la production de margarine avec le fluide frigorigère R717 a été menée.
- Le cinquième chapitre affecté pour le Calcul des charges thermiques de la chambre froide : qui consiste à quantifier tous les apports de chaleur que ce soit interne ou externe dans le but de déterminer la charge thermique totale qu'on doit extraire de la chambre froide afin de maintenir la température nécessaire pour le refroidissement de la margarine produite par l'entreprise qui est de 15°C.

Une fois les charges frigorifiques à produire sont calculées, on déterminera le cycle de fonctionnement de groupe frigorifique. En calculant la puissance frigorifique et les différentes performances thermodynamiques.

Introduction

Dans ce chapitre nous allons évoquer l'historique et l'évolution de l'entreprise CO.G.B la belle, et ses multiples activités industrielles. Par la suite, nous décrivent l'installation frigorifique à ammoniac.

I.1.Présentation de l'entreprise CO.G.B LA Belle

CO.G.B la Belle est une société de droit algérien créée par acte notarié établi le 14/05/2006. Elle est juridiquement une SPA avec un capital de 1000 000 000 DA avec une répartition de : 70% pour la Belle et 30% pour le groupe CO.G.B.

I.2.Historique

L'histoire de création de l'actuelle « COGB- La Belle » remonte aux années quarante quand il ya eu l'installation d'une usine conçue pour le raffinage de l'huile de colza et de tournesol.

En 1953, cette unité de production s'est lancée dans la production du savon de ménage « mon savon» pour qu'il soit conditionné après l'indépendance en 1966. Une chaîne de saponification a été acquise en 1973, pour qu'elle soit opérationnelle cinq ans plus tard, soit en 1978. Pendant cette période et plus précisément en 1974, ce complexe a été nationalisé de la « SIAN » Société Industrielle de l'Afrique du Nord et ce, au profit de la SO.GE.D.I.A qui était créée dans la même année.

Le complexe a exercé son activité pendant huit ans sous la tutelle de la SO.GE.D.I.A. En 1988 une autre unité de production est installée à la zone industrielle de Bejaia qui est le complexe des corps gras de Bejaia. Cette unité de production a connu des changements considérables en matière d'équipements de production que l'on enregistre durant ses 18 années de service avec ce statut. Après cela, il y a eu démarrage de la production de la graisse végétale et du produit végétal aromatisé « Soumaa » en 1990.

En 1997, il y a eu la naissance de la filiale CO.G.B, le démarrage de la margarinerie en 1999, le lancement de l'électrolyse et de l'hydrogénation en 2005. En août 2006, l'Etat a cédé 70 % des parts du complexe CO.G.B au profit du groupe *La Belle*, le complexe est ainsi renommé pour qu'il soit : « CO.G.B La Belle ». Au cours de la même année 2006, une chaîne PET a été acquise pour la fabrication d'emballage transparent 5 litres et le lancement d'un

nouveau conditionnement « huile Bonal », et la reprise de l'activité du Savone ménage « la caille ».

En 2007, une chaîne de conditionnement de la graisse végétale à usage industriel a commencé son activité avec des cartons de 25 kg.

I.3.Situation géographique

L'entreprise des corps gras de Bejaia (CO.G.B) est implémentée dans la zone industrielle à Iheddaden (Bejaia). Elle s'étend sur une surface de 108800 m² dont 56500 m² couvertes. L'unité est composée d'une raffinerie d'huile pour une production de 400 tonnes/jour, d'une savonnerie, d'un conditionnement d'huile et d'une margarinerie pour une production de 80 tonnes/jour.

I.4.Moyens de l'entreprise

CO.G.B la Belle dispose des moyens matériels qui peuvent se résumer comme suit :

- Nature des moyens : raffinerie, savonnerie, margarinerie et hydrogénation
- Origine des moyens : Europe, Canada.
- Les différentes machines utilisées dans la production : les souffleuses, les convoyeurs à air rafale, les remplisseuses, bouchonneuses, déviateur de bouteilles, fardeuse, encartonneuse, palettiseur, banderoleuses.

Les investissements réalisés par l'entreprise se résument à la rénovation des ateliers, acquisition de nouveaux matériels de production, machines de conditionnement et des moyens de transport.

I.5.Département production

Le département de production, ou bien l'assistant exploitation, regroupe l'ensemble des ateliers qui ont pour mission de suivre le processus de transformation des matières en produits finis, en respectant les normes de production. Avec un effectif estimé à 142 agents qui travaillent 24 /24, partagé en équipes de 8H/jour, ce département est composé de :

- **Service savonnerie :**

Son rôle est la fabrication du savon de ménage, savon de toilette ainsi que la glycérine pharmaceutique.

- **Service raffinage :**

Sa mission est la transformation de l'huile brute alimentaire destinée au conditionnement

➤ **Service conditionnement des huiles (CDH) :**

Ce service est partagé en deux ateliers :

- Atelier plastique : son rôle est la fabrication de bouteilles en plastique ;
- Atelier conditionnement : son rôle est la mise en bouteilles de l'huile pour la commercialisation.

➤ **Service margarinerie :**

Sa mission est la production d'hydrogène, d'huile hydrogène et de la margarine.

CO.G.B a pour objectif :

- D'améliorer la production qualitativement.
- De distribuer et de commercialiser tout produit relevant de son secteur d'activité.
- De développer l'industrie alimentaire.

I.6. Unité de margarinerie

La margarine est un produit alimentaire riche en graisses, utilisée comme substitut du beurre dans la cuisine ou l'industrie agroalimentaire. Elle peut être élaborée à partir d'une seule huile, huile de tournesol en générale, ou d'un mélange d'huiles végétales et animales. La margarine peut inclure d'autres éléments tels que du sel, des colorants ou des vitamines.

L'atelier de production de margarine de l'usine CO.G.B est composé de quatre secteurs :

- **Neutralisation** : élimination des acides gras libres par des solutions alcalines (soude caustique).
- **Décoloration** : élimination des pigments et des colorants (ainsi que de diverses impuretés ou composés indésirables) par voie physique, avec un traitement par les terres ou charbons absorbants.
- **Hydrogénation** : réaction chimique correspondant à l'addition de l'hydrogène sur des composés organiques insaturés. Au niveau de la margarinerie de CO.G.B, le but est d'élever le point de fusion des matières grasses.
- **Désodorisation** : élimination des produits odorants et volatils par injection de vapeur d'eau dans l'huile chauffée (180°C – 240°C), sous vide. Elle produit une huile à saveur neutre qui ne se transmet pas aux aliments, ce procédé élimine les restes de substances susceptibles de faire rancir l'huile, ce qui prolonge sa durée de conservation durant l'entreposage après son emballage.

Pour répondre aux attentes des différents consommateurs de ce produit, le complexe a lancé deux produits, à savoir : la margarine Palme d'Or et la margarine La Belle. Elle est composée

de : Mélange de matières grasses, Emulsifiant E 471, Lécithine, Arôme alimentaire, Colorant alimentaire, Eau osmosée, Sel, Acide citrique, Sorbate de potassium.

La margarine de table et la margarine de feuilletage diffèrent du fait que cette dernière est composée d'un mélange de matières grasses à un point de fusion de 45 °C. Tandis que la margarine de table comporte un point de fusion de 35 °c et une proportion plus forte en arôme de beurre.

I.7.Schémas d'installation frigorifique à ammoniac (R-717)

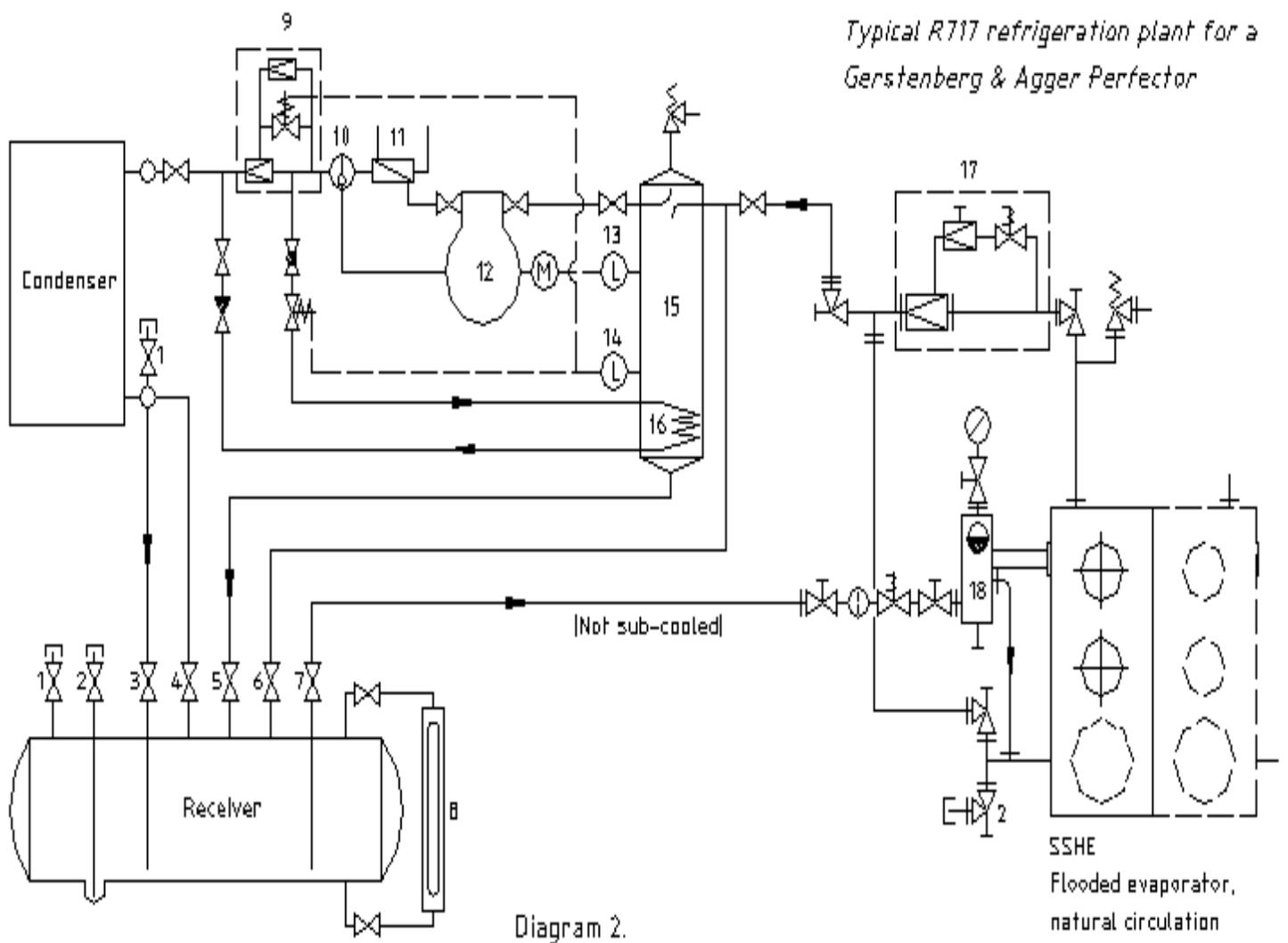


Figure I.1 : Installation frigorifique à ammoniac.

II.1. La production de 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. C'est de là qu'est venue l'idée de production de froid.

Qu'est-ce que la production du froid ?

La production de 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. [1]

II.2. Bref historique de la production de froid

- ❖ 1857 - Ferdinand Carre réalise la première machine frigorifique à compression, la première machine à absorption à fonctionnement continu (1860). Il est également le premier à utiliser l'ammoniac comme fluide frigorifique.
- ❖ 1876 Charles Tellier aménagea le premier navire à cales réfrigérées, qui réussit à transporter sur le trajet Rouen Buenos Aires des viandes. [2]

II.3. Domaines d'utilisation du froid

Les propriétés de corps et les mécanismes pouvant être gravement touché 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.2 : Conservation des produits médicaux.

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



Figure II.3 : 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.4 : 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.4. 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 :

II.4.1. Différents modes de la production du froid

- Installation frigorifique à compression
- Installation frigorifique à gaz froid (principe de Stirling)
- Installation frigorifique à absorption
- Production du froid thermoélectrique (élément Peltier)
- Générateur de froid à Vortex

II.4.2. Installation frigorifique a compression

L'installation frigorifique à compression est l'installation qui est la plus fréquemment utilisée pour la production du froid. Ici on met à profit l'effet consistant en ce que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise grâce aux différentes pressions survenant lors de l'évaporation et de la condensation, les niveaux de température peuvent être ajustés de telle sorte qu'il se produise un transport de chaleur du côté froid vers le côté chaud.

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

Comme agent réfrigérant, on utilise des liquides à ébullition légère comme les hydrocarbures fluorés (HF) du propane du CO₂ ou du NH₃. [7]

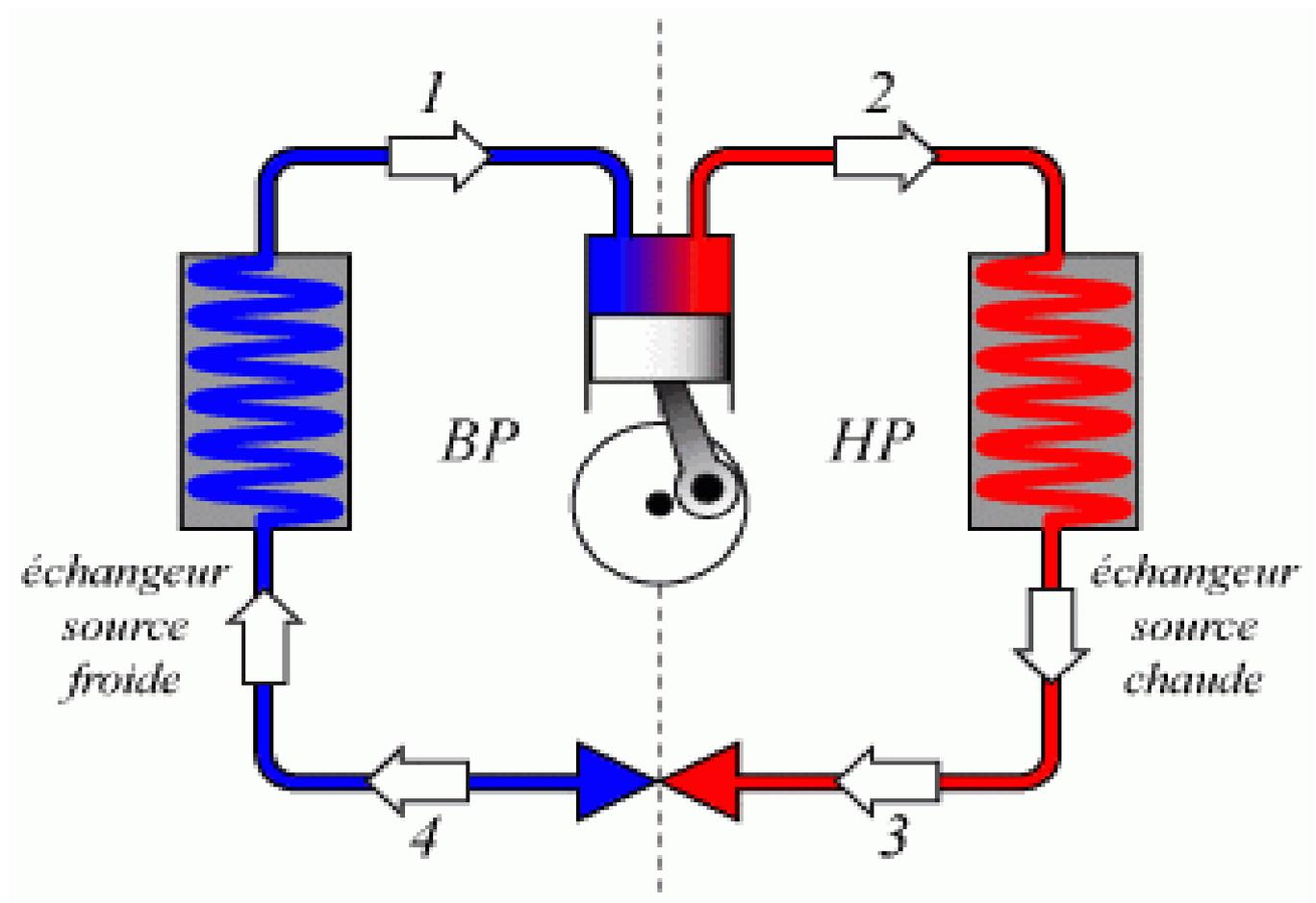


Figure II.5 : Machine à compression mécanique.

II.4.3. Installation frigorifique a gaz froid

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

L'installation frigorifique à gaz froid correspond au moteur stirling connu, sauf que le sens de la rotation est inversé. Ainsi le sens du passage, du cycle est inversé et une machine motrice devient une machine productrice de travail comme pompe à chaleur. [7]

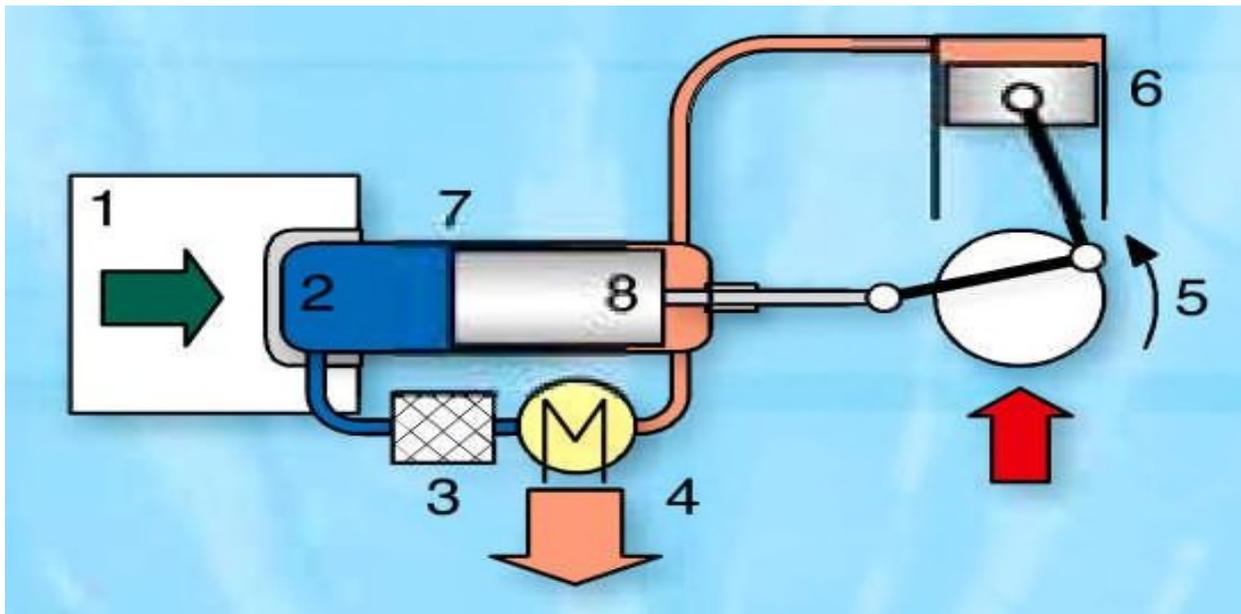


Figure II.6 : Machine à gaz froid.

II.4.4. Installation frigorifique à absorption

Dans le cas d'une installation à absorption, on utilise de l'ammoniaque (NH_3) comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide s'évapore dans un évaporateur, se chargeant de chaleur. Dans un absorbeur, l'ammoniaque en forme de vapeur est ensuite dissoute dans de l'eau. La solution ammoniacale est chauffée, de telle sorte que se dégage de l'ammoniaque sous forme de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniacale est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniaque liquide.

Afin de pouvoir établir une différence de température entre l'évaporation et la condensation, il faut créer une différence de pression. Celle-ci est produite par une pompe pour la solution ou pour ce que l'on appelle un L'installation frigorifique à compression est l'installation qui est la plus fréquemment utilisée pour la production du froid. Ici on met à profit l'effet consistant en ce que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise grâce aux différentes pressions survenant lors de l'évaporation et de la condensation, les niveaux de température peuvent être ajustés de telle sorte qu'il se produise un transport de chaleur du côté froid vers le côté chaud.

Comme dans ce cas, l'agent réfrigérant circule dans un circuit fermé, on parle d'un cycle frigorifique. Au lieu du compresseur à piston présenté, on peut également utiliser des

compresseurs à vis, des compresseurs scroll, des turbocompresseurs ou des compresseurs à éjection de vapeur.

Comme agent réfrigérant, on utilise des liquides à gaz auxiliaire (hydrogène H₂). Lors de l'utilisation du gaz auxiliaire, on peut faire l'économie d'une pompe et l'installation frigorifique ne possède pas de pièces mobiles. L'arrivée de l'énergie d'entraînement s'effectue via le bouilleur et elle est uniquement thermique. Le réchauffement du bouilleur peut s'effectuer électriquement ou avec du gaz. On peut également utiliser la chaleur perdue ou l'énergie solaire. [7]

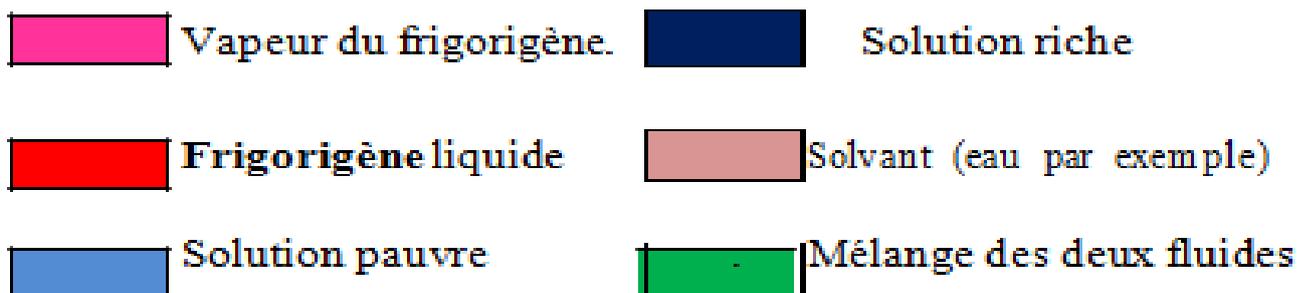
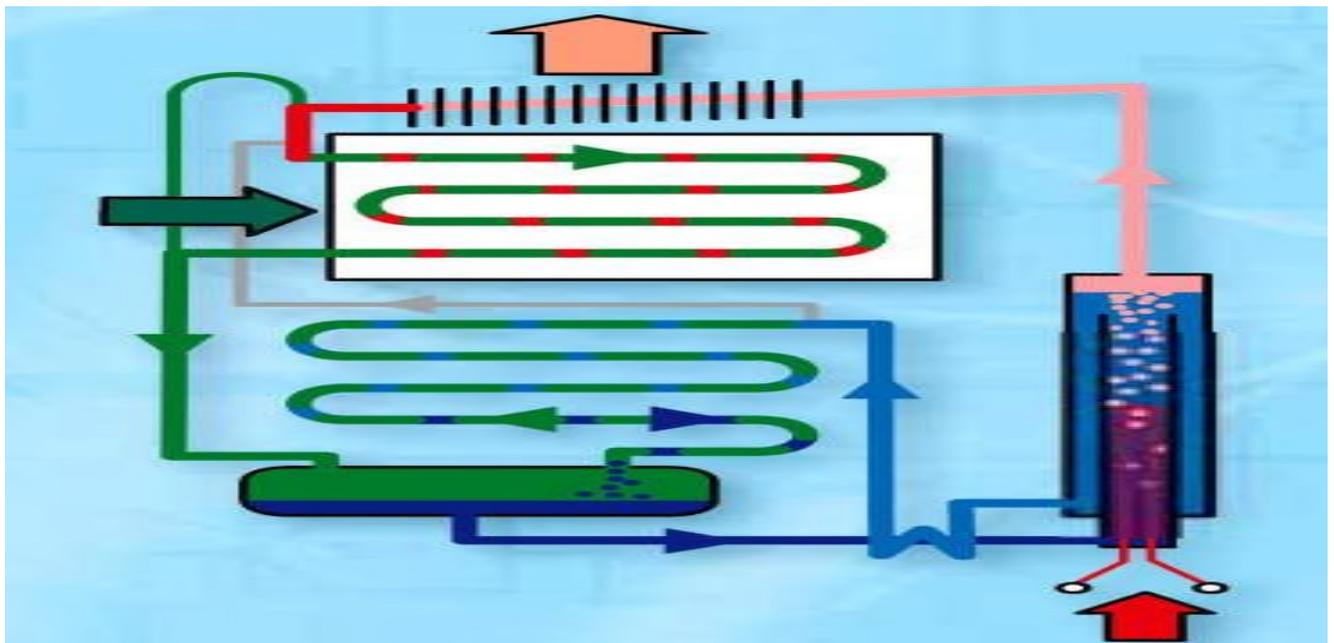


Figure II.7 : Machine à absorption.

II.4.5. Installation frigorifique thermoélectrique

Les installations frigorifiques thermoélectriques opèrent avec l'effet Peltier. Ce mode de fonctionnement correspond à l'inversion du fonctionnement du thermocouple que l'on connaît de la mesure de la température. Dans le cas de l'élément Peltier, on utilise un matériau semi-conducteur spécial.

On peut obtenir des températures très basses le rendement diminuant cependant fortement avec une augmentation de la différence de température

Les éléments Peltier sont utilisés avec du courant continu, la direction du courant indiquant la direction qu'emprunte le transport de la chaleur. Pour cette raison, les éléments Peltier peuvent refroidir et chauffer, ils sont facilement réglables et ne possèdent pas de parties mobiles ou des admissions de liquides. [7]

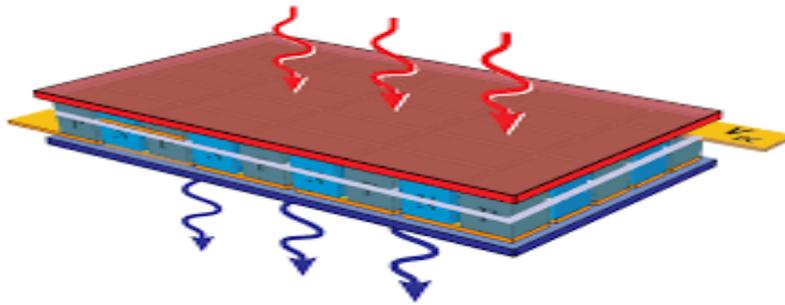


Figure II.8 : Machine thermoélectrique

II.4.6. Générateur de froid à vortex

Le générateur de froid à Vortex fait partie des machines frigorifiques exceptionnelles. Ici on produit un flux d'air froid et chaud à partir d'un flux d'air comprimé venant de la température ambiante. L'air comprimé entre de manière tangentielle dans une chambre à Vortex et ici, il est pris dans une rotation rapide. Au centre du Vortex, il se forme un flux d'air froid, alors que la couche extérieure du Vortex se réchauffe. L'air froid est retiré au centre et peut servir au refroidissement.

L'avantage de cette machine frigorifique consiste en ce qu'elle a une structure simple, qu'elle ne possède pas de pièces mobiles et qu'elle ne requiert pas de carburants toxiques et aucune alimentation en courant électrique. L'inconvénient consiste dans le faible rendement. [7]

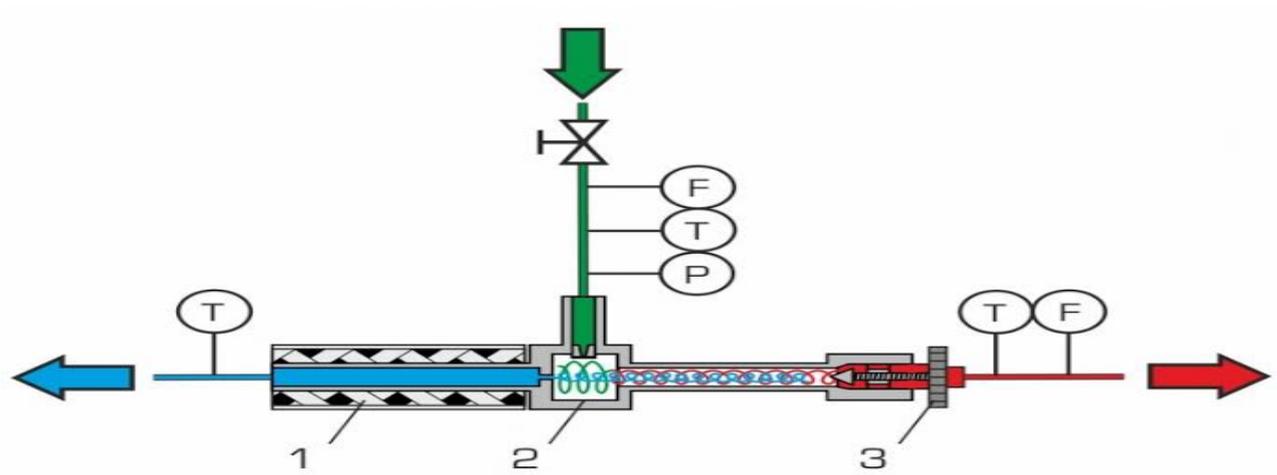


Figure II.9 : Machine de froid à vortex.

II.5. Différents éléments d'une installation frigorifique

Les éléments de base d'une installation frigorifique sont : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur.

II.5.1. Compresseur

C'est un organe qui aspire de la vapeur sèche et la refoule vers le condenseur, après l'avoir comprimée. Parmi les compresseurs les plus utilisés en froid, on trouve :

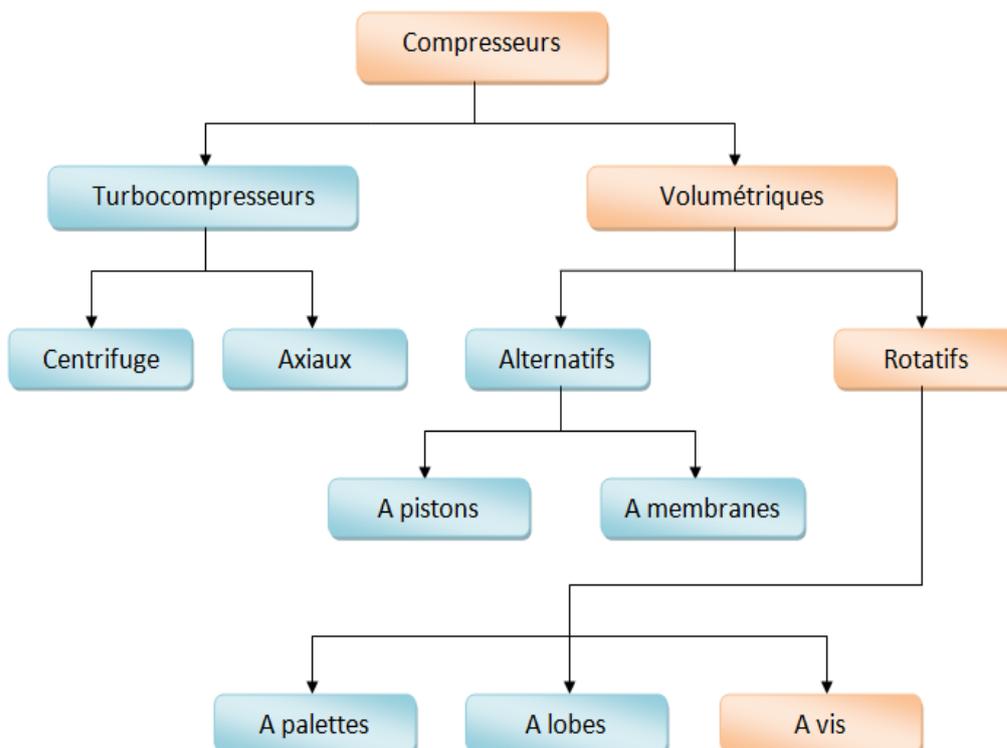


Figure II.10 : Types de compresseurs.

- **Compresseur volumétriques**

Il existe plusieurs types de compresseur volumétriques :

- **Compresseurs à pistons (alternatifs)**

- ↳ **Compresseur hermétique ou non accessible** : l'ensemble moteur et compresseur est dans une enveloppe commune en tôle d'acier, soudée, étanche et rendant l'ensemble inaccessible mécaniquement ou électriquement.

- ↳ **Compresseur semi hermétique ou hermétique accessible** : l'ensemble moteur et compresseur est dans une même enceinte étanche (généralement en fonte), mais accessible du côté mécanique (changement de pièces telles que clapets, etc.).

Les compresseurs hermétiques et semi-hermétiques sont utilisés pour tous les fluides frigorigènes à l'exception de l'ammoniac (à cause des enroulements en cuivre des moteurs électriques).

- ↳ **Compresseur ouverts** : ce compresseur est indépendant du moteur. Son vilebrequin sort du carter et est équipé d'une garniture d'étanchéité. Cet arbre peut être accouplé à l'arbre moteur.

- **Compresseur à palettes(rotatifs) :**

- ↳ **Compresseur à piston tournant** : ces compresseurs assurent la compression et le transfert du gaz comme pour les pistons et les vis, par réduction de l'espace offert au fluide ; le volume est constitué par un ensemble de cellules à géométrie variable.

- ↳ **Compresseur à piston roulant** : dans ce type de machines, semblables aux précédentes, une seule palette mobile radialement est articulée sur le stator, alors que le rotor tourne à l'intérieur du stator, mais la génératrice de contact se déplace, et l'axe de rotation coïncide avec l'axe du cylindre fixe et il est excentré par rapport au piston.

- ↳ **Compresseur hélicoïdaux ou à vis (rotatifs)** : le compresseur 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 mâle), l'autre formant des alvéoles (rotor femelle). Ces profils sont décalés le long de l'axe de la machine suivant une 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.

- **Compresseurs spiroïdaux ou scroll (rotatifs) :** le compresseur hélicoïde utilise des rotors à trois dimensions, on peut dire, en simplifiant, que le scroll travaille en deux dimensions, malgré sa structure tridimensionnelle.
- **Compresseurs cinétiques**
 - ↳ **Compresseurs centrifuges :** les compresseurs centrifuges permettent de véhiculer des volumes relativement importants de fluide frigorigène avec un taux de compression modéré. On peut naturellement, en multipliant le nombre d'étages, obtenir des taux de compression élevés, mais la limite d'utilisation fait que, bien souvent, les compresseurs volumétriques, mieux adaptés à des taux de compression élevés, deviennent moins coûteux.

Le compresseur centrifuge trouve par conséquent son application là, plus étendue dans le domaine du conditionnement de l'air ou il suffit, le plus souvent, de refroidir de l'eau à une température comprise entre +4 et +10°C [4].

II.5.2. Condenseur

Sa fonction est d'évacuer, à l'extérieur les calories prélevées par l'évaporateur et celles fournies par le compresseur tout en transformant les vapeurs surchauffées à haute pression en liquide sous refroidie haute pression, il est caractérisé par trois zones de fonctionnement.

1. Refroidissement de la vapeur surchauffée qui permet un dégagement d'une chaleur sensible ;
2. Condensation en un liquide à une température constante, libérer une chaleur dite latente ;
3. Sous refroidissement du liquide par le dégagement d'une chaleur sensible, jusqu'à ce que la température soit égale ou un peu supérieure à celle du médium de refroidissement.

Cette quantité de chaleur peut être retirée au condenseur par l'air ambiant grâce aux ailettes de refroidissement ou bien, dans les groupes plus importants, par de l'eau circulant dans une double tubulure.

On peut répartir les condenseurs en trois types, selon la nature du fluide secondaire : condenseurs à air, condenseurs à eau, condenseurs à évaporation d'eau ou évaporatifs [5]

- **Condenseurs à air**

Ces derniers sont très répandus pour les petites et moyennes puissances car l'air est une source naturelle et gratuite.

- **Condenseurs à eau**

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

- **Condenseurs évaporatifs ou évapo-condenseurs**

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

II.5.3. Evaporateur

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

On rappelle que l'évaporateur du circuit à haute température joue le rôle de condenseur pour le circuit à basse température.

On ne pourra jamais dissocier un évaporateur de son système d'alimentation en fluide frigorigène.

De plus, chaque appareil selon sa technologie propre, est justiciable d'un système de détente particulier.

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

- **Evaporateurs refroidisseurs d'air**

Ils sont à convection naturelle ou à convection forcée.

- 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 (par exemple caves d'affinage de certains fromages, triperies, abats et poissons).

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

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

- **Evaporateurs refroidisseurs du liquide**

On distingue quatre catégories : immergés, multitubulaires noyés, multitubulaires à détente sèche et à plaques.

- Evaporateurs immergés : l'évaporateur est constitué par un ensemble de serpentins ou de tubes horizontaux ou verticaux.
- Evaporateurs multitubulaires noyés : ces appareils sont très utilisés pour le refroidissement de l'eau glacée avec des compresseurs centrifuges ou à vis utilisant des fluides halogénés.
- Evaporateurs à détente directe : dans un évaporateur à détente directe, la circulation du fluide frigorigène s'effectue à l'intérieur des tubes, alors que le liquide à refroidir circule coté calandre. Ils sont utilisés essentiellement avec les fluides HFC.
- Evaporateurs à plaques : ils sont de construction analogue à celles des condenseurs à plaques et du type brasé, plaques et joints, plaques soudées en cassettes ou plaques rondes soudées [4].

II.5.4. Détendeur

Le rôle du détendeur est de régler le débit de circulation et de faire chuter la pression du fluide frigorigène dans le circuit ; la quantité de fluide admise à l'évaporateur en un temps donné doit être exactement égale à la quantité qui peut se vaporiser et qui correspond à la chaleur absorbée.

S'il en est ainsi, le détendeur assure le maintien dans l'évaporateur et dans le condenseur des pressions et températures les plus avantageuses pour l'installation considérée et pour les conditions extérieures données.

II.5.4.1. Détendeurs les plus utilisés sont

❖ Différents types de détendeurs

- Tube capillaire
- Détendeur manuelle
- Détendeur automatique
- Flotteur basse pression
- Flotteur haute pression
- Détendeur thermostatique : on distingue :
 - ↳ Thermostatique à égalisation de pression interne
 - ↳ Thermostatique à égalisation de pression externe

Et le détendeur thermostatique le plus utilisé c'est :

Le détendeur capillaire, le détendeur thermostatique, le détendeur thermostatique à égalisation de pression externe, le détendeur à commande électronique. [3]

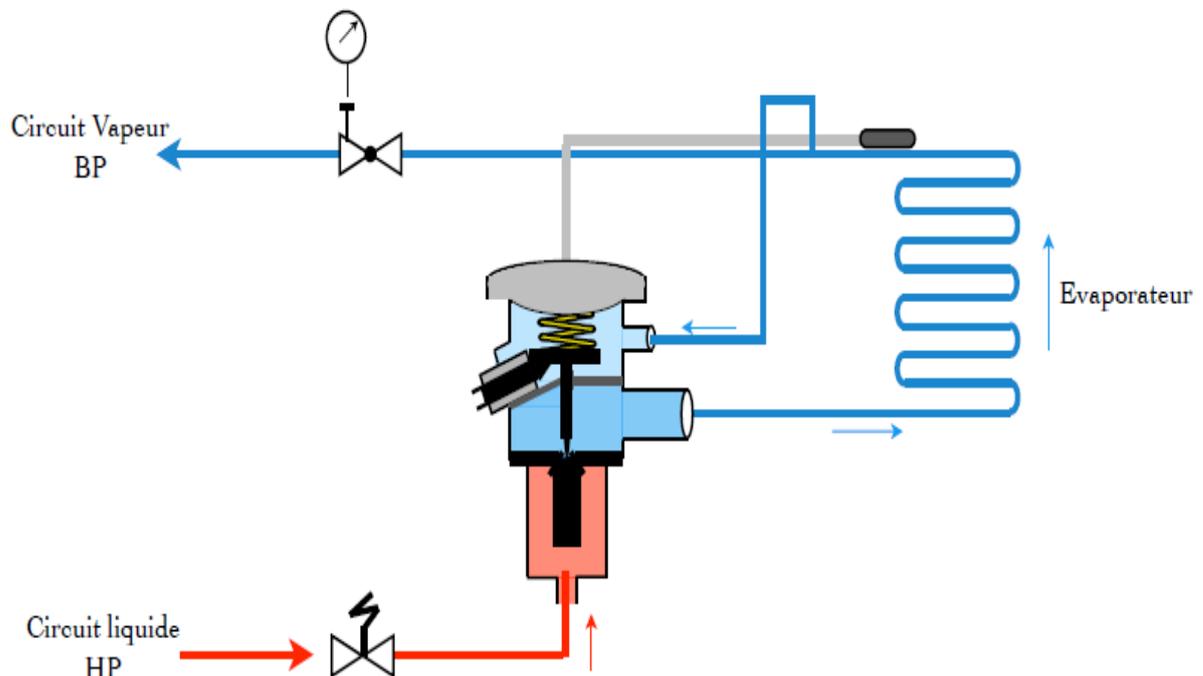


Figure II.11 : Constitution du détendeur thermostatique à égalisation de pression externe.

II.6. Thermodynamique de froid

II.6.1. Cycle frigorifique de Carnot

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

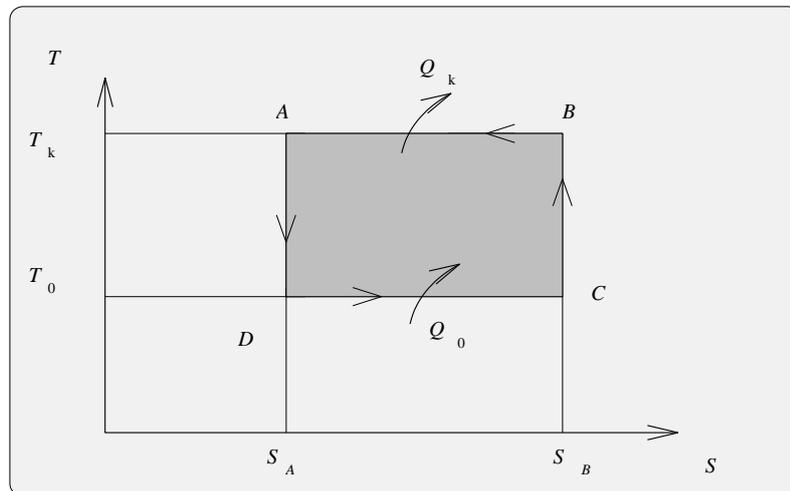


Figure II.12 : Cycle idéal de Carnot (cycle de référence) [2].

La chaleur absorbée par l'évaporateur (Q_0) est :

$$1^{\text{er}} \text{ principe : } W + Q_0 + Q_K = 0$$

$$2^{\text{em}} \text{ principe : } Q_0 = T_0(S_0 - S_D)$$

La chaleur cédée par le condenseur (Q_K) est :

$$Q_k = T_k(S_A - S_B)$$

$$\text{Or } S_A = S_B \text{ et } S_B + S_A$$

Le travail consommé par le compresseur s'écrit (W) est :

$$W = -(Q_0 - Q_k)$$

$$W = -[T_0(S_C - S_D) + T_K(S_A - S_B)]$$

$$= -[T_0(S_B - S_A) + T_k(S_A - S_B)] = -(S_B - S_A)(T_0 - T_K)$$

$$= -(S_B - S_A)(T_0 - T_K)$$

$$\text{Or } S_A < S_B \text{ et } T_0 < T_k \text{ et donc : } W > 0$$

Le système reçoit le travail W , prend la chaleur Q_0 à la source froide et cède la quantité de chaleur Q_k à la source chaude.[2]

II.6.2. Diagramme thermodynamiques

Il existe différents types de diagrammes thermodynamique, couramment utilisés, qui permettent de connaître les propriétés d'un fluide avec différentes représentations.

Les diagrammes les plus utilisés sont :

II.6.2.1. Le diagramme entropique (T, s) :

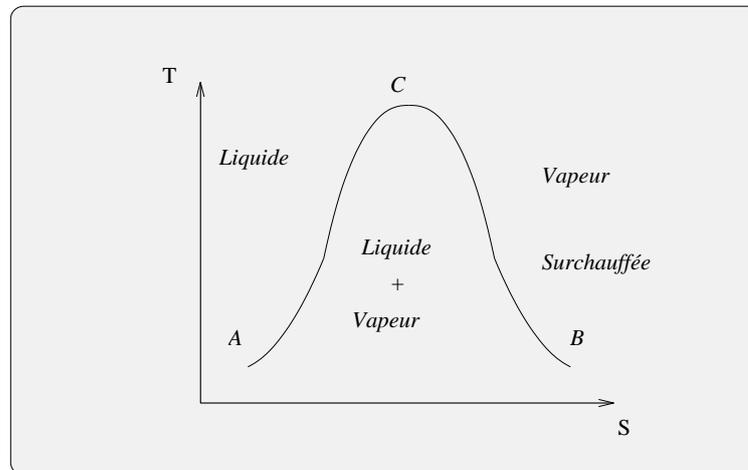


Figure II.13 : Diagramme T-S d'un mélange liquide-vapeur [2].

1. Les isothermes sont horizontales,
2. Les adiabatiques réversibles sont verticales,
3. Les adiabatiques irréversibles sont des courbes inclinées vers des valeurs croissantes de S,

II.6.2.2. Le diagramme de Mollier (h, s)

Ce diagramme 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.

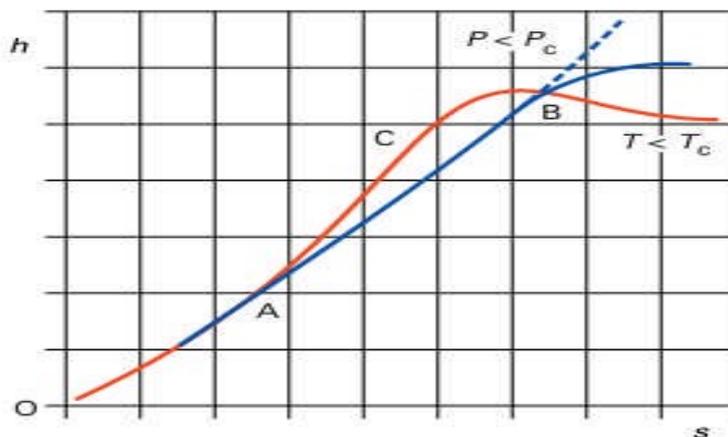


Figure II.14 : Diagramme de Mollier (h, s).

II.6.2.3. Le diagramme (h, ln P), dit « diagramme des frigoristes »

Ce diagramme est également appelé diagramme de Mollier des frigoristes.

Il est surtout utilisé pour l'étude des cycles de réfrigération.

Diagramme P-H

On choisit de prendre une échelle linéaire des températures dans la zone liquide-vapeur.

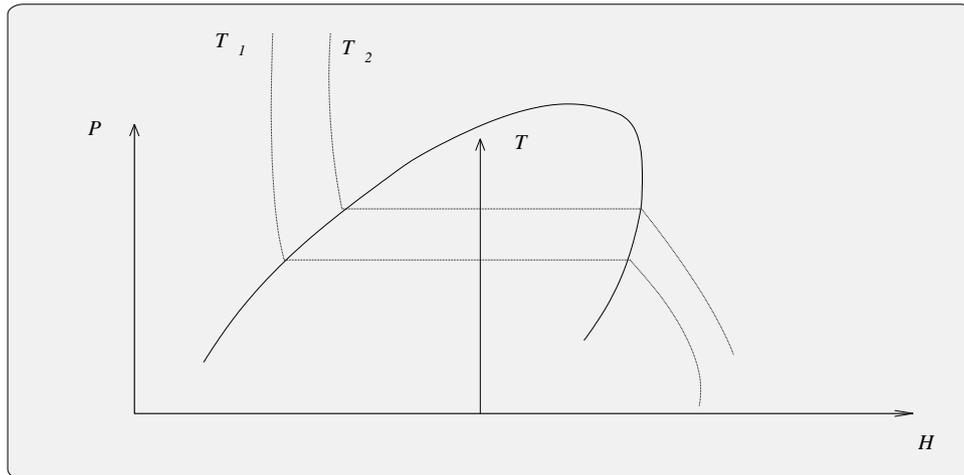


Figure II.15: Diagramme des frigoristes[2].

Les courbes isothermes sont pratiquement verticales dans la zone liquide, horizontales dans le zone de saturation, puis descendantes dans la zone vapeur,

- Les courbes isochores sont croissantes avec un point de réfraction.

Remarque :

Les fluides frigorigènes sont toujours utilisés loin du point critique, et au voisinage de la courbe de saturation. En conséquence on enlève la partie supérieure et l'on réduit la représentation de l'état liquide en changeant d'échelle.

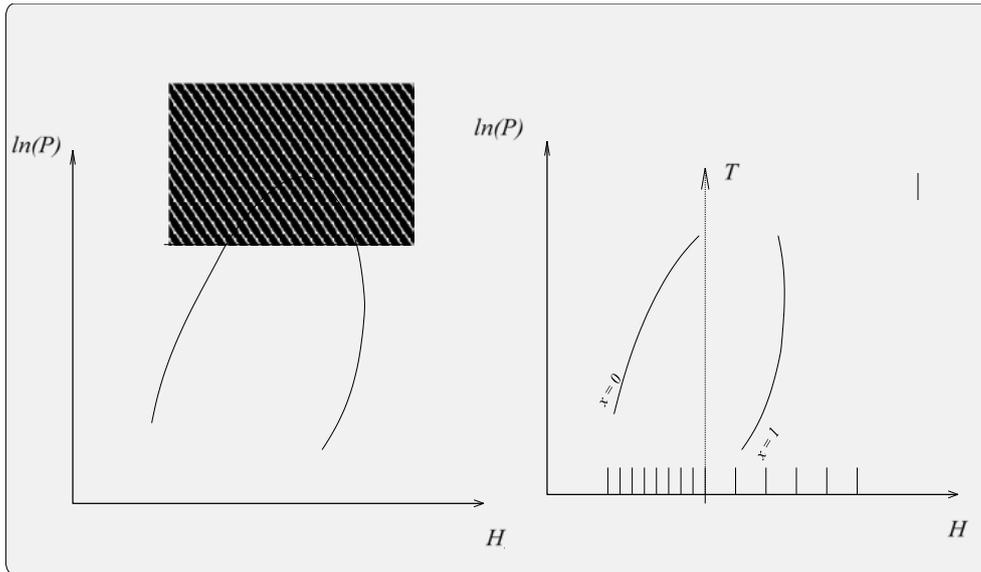


Figure II.16: Courbes isoparamétriques [2].

II.6.2.4. Diagramme enthalpique : propriétés Courbes isoparamétriques

- courbe de saturation : son allure diffère, mais délimite toujours les zones liquide, liquide + vapeur, vapeur,
- les courbes isobares sont horizontales,
- les courbes isenthalpiques sont verticales,

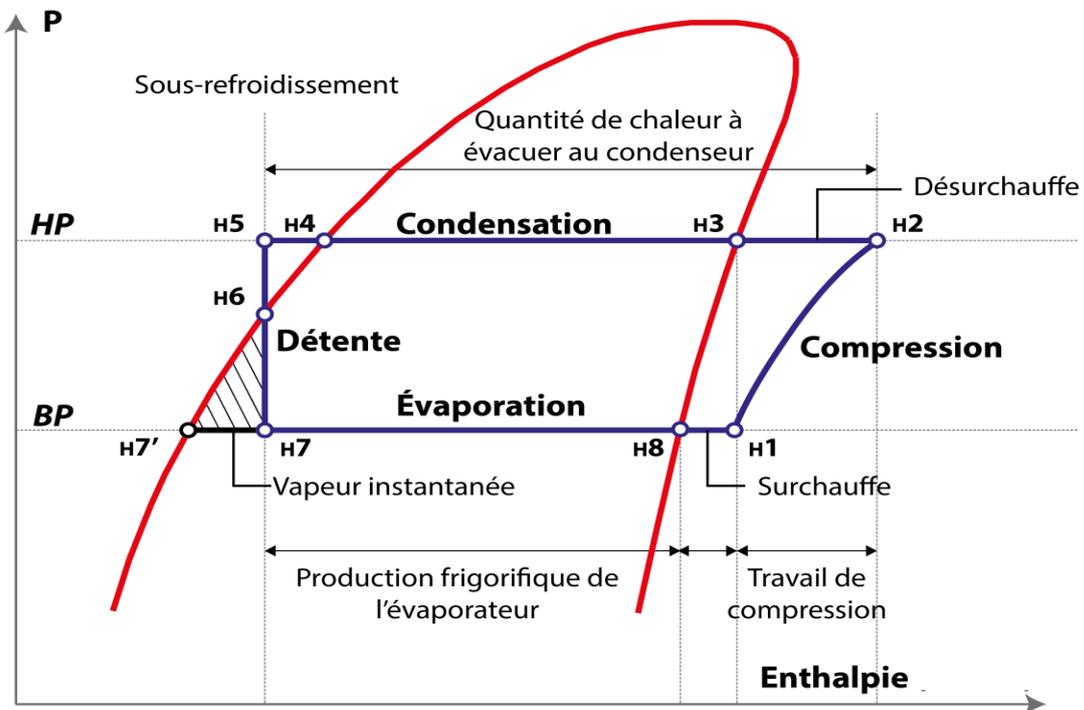


Figure II.17: Évolution d'un frigorigène sur un diagramme enthalpique.

II.6.3. Calcul des différentes performances frigorifiques

Diverses formules pour sélectionner le matériel :

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

$$q_m = \frac{\phi_0}{h_8 - h_7}$$

q_m : Débit massique [kg/s].

ϕ_0 : Puissance frigorifique désirée [kW].

h_7 : Enthalpie massique du point 7 (entre évaporateur) [kJ/kg].

h_8 : Enthalpie massique du point 8 (sortie évaporateur) [kJ/kg].

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

$$q_{v1} = q_m \cdot V_1''$$

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

V_1'' : Volume spécifique au point 1 [m³/kg].

- **Rendement volumique du compresseur**

$$\eta_v = 1 - 0,05 \left(\frac{HP}{BP} \right)$$

η_v : Rendement volumétrique du compresseur.

$\frac{HP}{BP}$: Taux de compression (pression absolue).

Rendement effectif d'un compresseur :

$$\eta_{eff} = 0,8 - 0,004 \cdot (\tau - 5)^2 - \frac{0,5}{\tau - 0,3}$$

- **Puissance théorique du compresseur :**

$$P_{th\ cp} = q_m \cdot (h_{2th} - h_1)$$

$P_{th\ cp}$: Puissance théorique du compresseur [kW].

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

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

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

- **Puissance rejetée au condenseur :**

$$\theta_k = q_m \cdot (h_2 - h_4)$$

θ_k : Puissance rejetée au condenseur [kW].

- **Coefficient de performance frigorifique (cop) :**

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

P_{eff} : Puissance effective du compresseur.

Φ_0 : Puissance frigorifique produit

III.1. Fluides frigorigènes

III.1.1. Définition

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

Les fluides frigorigènes ont la particularité d'avoir sous la pression atmosphérique une température d'évaporation très faible, cette propriété thermodynamique permet de produire de froid ou de chaude. [15]

III.2. Propriétés des fluides frigorigènes

- 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
- 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
- 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.3. Différents types du fluide frigorigène

On distingue parmi ses fluides frigorigènes quatre catégories suivant leurs propriétés physico-chimiques citées ci-dessus en :

- Les composés inorganiques purs.
- Les composés organiques purs.
- Les mélanges organiques.
- Composés divers.

Chaque frigorigène qu'il soit une substance pur ou mélange peut être identifié par une désignation numérique c'est-à-dire un chiffre qui va suivre le symbole R comme réfrigérant

III.3.1. Composés inorganiques purs :

Fluide pur se trouvant dans la nature. Définie par la série des 700, les deux derniers chiffres indiquent la masse molaire du corps.

Exemple : le code pour l'ammoniac est le R717 (NH₃) ,17 correspond à la masse molaire de l'ammoniac (17.03g/mol).

D'autres composés de ce même groupe sont l'eau (H₂O), désignée par le code R718, le dioxyde de carbone (CO₂) qui porte le code R744, et le dioxyde de soufre (SO₂) qui porte le code R764.

Des composés telle que l'ammoniac et le dioxyde de carbone ont été utilisés au part avant puis abandonnés pour leurs dangersités.

Parmi tous ces fluides frigorigènes, l'ammoniac est de nouveau réutilisé pour ces nombreux avantages :

- Ecologique : n'attaque pas à la couche d'ozone et n'a aucun effet de serre ; durée de vie de quelques jours seulement.
- N'est pas visé par le protocole de Montréal.
- Est bon marché.
- Est connu et éprouvé depuis plus d'un siècle.
- Est le meilleur sur le plan thermodynamique (performance, COP...).
- Est facile à détecter.

D'autres composés inorganiques, comme le dioxyde de soufre (SO₂) qui ont joué dans le passé un grand rôle dans la technique frigorifique, ne sont plus utilisés aujourd'hui en raison de leurs inconvénients.

III.3.2. Composés organique purs

III.3.2.1. Types de composés organiques purs

Les composés organiques, tout au moins ceux aux molécules plus simples, constituent les ensembles de frigorigènes les plus riches et les plus diversifiés. La majorité des composés organiques en tant que frigorigènes présent dans le domaine de la production du froid peuvent être saturés ou bien se présenter sous une double liaison, on distingue :

III.3.2.1.1. Les hydrocarbures :

Les composés organiques contenant du carbone et de l'hydrogène les plus utilisés en production du froid sont les hydrocarbures (HC). Néanmoins, les hydrocarbures légers (jusqu'au propane inclus) sont déjà classés avec les composés halogénés dans la mesure où on peut les considérer comme des hydrocarbures halogénés sans halogène.

X = 0, HC si Z = 0 (R-50, méthane CH₄) ;

X = 1, HC si Z = 0 (R-170, éthane C₂H₆) ;

X = 2, HC si Z = 0 (R-290, propane C₃H₈) ;

X = 3, série des R-600 : butane, R-600a : isobutane.

III.3.2.1.2. Les hydrocarbures halogènes

Les fluides frigorigènes du groupe des halocarbures, c.-à-d. les CFC, les HCFC et les HFC, sont les réfrigérants les plus communs. Ceux-ci ont comme éléments principaux des atomes de carbone et de fluor ainsi que, selon le cas, des atomes d'hydrogène et /ou de chlore. La proportion de ces atomes dans la molécule détermine les propriétés physiques du réfrigérant.

- **Les CFC (Chlorofluorocarbures) :**

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

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

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

CFC
R 11
R 12
R 113
R 115
R 502

III.3.2.1.3. Les HCFC (Hydrochlorofluorocarbures)

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

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

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

III.3.2.1.4. Les HFC (Hydrofluorocarbures)

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

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

HFC	
R32	R404A
R125	R407C
R134a	R410A
R143a	R507
R152a	

III.4. Mélanges organiques

Ils sont composés de deux catégories bien distinctes ; les mélanges azéotropiques et les mélanges non azéotropiques.

a. 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.

b. Mélanges zéotropiques :

Un mélange zéotropique, est un mélange dont la composition des deux phases liquide et vapeur sont différentes quand elles coexistent.

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 ou 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. [15]

Tableau III.4 : Classification de quelques fluides frigorigènes en fonction de leur toxicité et leur inflammabilité [18]

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

R 142b	1-Chloro-1,1-Difluoroéthane	CH ₃ CClF ₂	A2
--------	-----------------------------	-----------------------------------	----

Hydro fluorocarbures HFC			
R 32	Difluorométhane	CH ₂ F ₂	A2
R 125	Pentafluoroéthane	CHF ₂ CF ₃	A1
R 134a	1,1,1,2-tétrafluoroéthane	CH ₂ FCF ₃	A1
R 143a	1.1.1trifluoroéthane	CH ₃ CF ₃	A2
R 152a	1,1Difluoroéthane	CH ₃ CHF ₂	A2
Mélange azéotropique			
R502	////////////////////	R22, R115 (48.8, 51.2)	A1
R 507	////////////////////	R125, R143a (50, 50)	A1
Mélange zéotropique			
R 404A	////////////////////	R125, R134a, R143a (44, 52, 4)	A1
R407C	////////////////////	R32, R125, R134a (23, 25, 52)	A1
R 410A	////////////////////	R32, R125 (50, 50)	A1

III.5. Autres fluides

Certains fluides frigorigènes ont pu être utilisés ou sont utilisés de façon très ponctuelle

et rare ainsi on pourra trouver :

1. Les éthers ;
2. Les amines aliphatiques ;
3. Les alcools ;
4. Composés tri halogènes ; [18].

Tableau III.5 : Description d'autres fluides frigorigènes utilisés dans le froid [18].

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

III.6. Nomenclature et les critères de choix

III.6.1. La nomenclature

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

Cette classification permet de classer de façon claire et univoque la totalité des fluides frigorigènes. Le code d'identification comprend un préfixe constitué de lettres et de suffixe constitué chiffres [13].

On définit R WXYZW :

W : Nombre d'instauration carbone ;

X : Nombre d'atome de carbone -1 ;

Y : Nombre d'atome d'hydrogène +1 ;

Z : Nombre d'atome de fluor ;

❖ **Série R 400- R 500 :**

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

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

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

❖ **Série R 600 :**

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

Composés oxygénés R 610 (éthyle éther).

Composés azotés R 630 (méthyle amine).

❖ **Série R 700 :**

Composé inorganiques.

La numérotation commence par 7 suivis de 2 chiffres correspondant à la masse molaire du composé. [5].

III.6.3. Critères du choix

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

1. Critères thermodynamiques :

Ces critères consistent principalement le constructeur de machine.

- La pression d'évaporation est nécessairement supérieure à la pression normale pour éviter les entrées d'air et d'humidité. La température d'ébullition doit être inférieure à la température d'évaporation.
- Température critique importante, la température de condensation doit être inférieure à la température critique.
- L'échauffement à la compression doit être réduit donc le coefficient de compression τ aussi petit que possible.
- Production frigorifique volumétrique spécifique : c'est la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur rapporté à l'unité du volume de vapeur aspiré au niveau du compresseur, désigné par $\phi_{0v} = (h_6 - h_5) / V_1''$ elle doit être aussi grand que possible.
- La condensation sera d'autant plus aisée que la chaleur massique de la vapeur saturante est faible [17].

2-Critères techniques :

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

3-Critère de sécurité :

- Bonne stabilité chimique, compte tenu de l'importance des écarts de température auxquels ils sont soumis à chaque cycle.
- Sécurité alimentaire ; en cas de fuite, inactivité sur les denrées, non nocif pour le personnel, facilement détectable.
- Ininflammabilité et inexplosibilité (non explosif) en cas de mélange avec l'air.

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

- a) **Inflammabilité** : il existe trois groupes basé sur la limite inférieure de l'inflammabilité à la pression atmosphérique et à la température ambiante :
- Groupe 1 : non inflammable quel que soit la concentration dans le locale.
 - Groupe 2 : frigorigène dont la limite inférieure de l'inflammabilité est supérieure ou égale à 3.5% en volume par volume d'air.
 - Groupe 3 : frigorigène dont la limite inférieure d'inflammabilité est inférieure à 3.5% en volume par volume d'air.
- b) **Toxicité** : les fluides frigorigènes sont répartis en deux groupes :
- Groupe A : fluide frigorigène dont la concentration moyenne égale ou supérieure à 400ml/m³ n'a pas d'effets défavorables sur presque tous les travailleurs qui peuvent être exposés jours après jours pendant 8 heures et une semaine de travail de 40 heures.
 - Groupe B : fluides frigorigène dont la concentration moyenne inférieure à 400ml/m³ n'a pas d'effet défavorable sur presque tous les travailleurs qui peuvent être exposé jours après jours pendant 8 heures et une semaine de travail de 40 heures. [5].

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

Tableau III.6 : Groupes des sécurités pour les fluides frigorigènes [14].

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

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

Tableau III.7 : Classement quelque fluide frigorigène [14].

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

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

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

III.7. Impact des fluides frigorigène

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

III.7.2. Impact sur l'environnement

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

III.7.2.3. Indice d'impact :

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

1. ODP : Ozone déplétion potentiel :

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

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

2. GWP : Globale warning potentiel :

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

3. TEWI: Totale équivalent warning impact:

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

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

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

tel que : GWP : Globale warning potentiel ;

L : émission annuelles de fluide en kg ;

n : durée de vie de système en années ;

m : charge en fluide frigorigène en kg ;

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

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

B : émission de CO₂ en [kg/kWh] ;

III.7.2.4. Impact sur la santé et la sécurité

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

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

- Toxicité comme l'ammoniac NH₃ ;
- Inflammabilité comme le R 290 et l'ammoniac ;
- Des pressions utilisées dans les circuits HP (haute pression) ;

III.7.2.5. Impact sur le bilan énergétique

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

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

R404A donne des meilleures performances énergétiques que le R22. [14].

III.8. Propriétés chimiques et physiques de l'ammoniac

Tableau III.8 : Propriétés chimiques et physiques de l'ammoniac [19].

Masse molaire	g/mol	17,03
Point critique	°C	-77,9
Point d'ébullition (sous 1,013 bar)	°C	-33,5
Densité de la vapeur saturé à 25 °C	kg/dm ³	0,602
Tension de vapeur à : 25 °C 50 °C	bar	10,03 20,33
Température critique - Pression critique - densité critique	°C bar kg/m ³	132,53 113,53 234
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition	kJ/kg	1367,9
Rigidité diélectrique à 20 °C et 8,46 bar	Azote = 1	0,82
Tension de surface à 30 °C	10 ⁻³ N/m	28,5
Solubilité du fluide dans l'eau à 0 °C à 20 °C à 30 °C	g/l g/l g/l	900 520 407
Viscosité à 30 °C - Liquide - Vapeur sous 1,013 bar	10 ⁻³ pa.s (centipoise)	0,136
Capacité thermique massique à 30 °C - Liquide - vapeur sous 1 ,013 bar	kJ/(kg.K) kJ/(kg.K)	4,78 2,16
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar		1,335
Inflammabilité dans l'air	T° inflammation	630 °C
Limite explosivité à 20 °C et 1,013 bar Inférieur Supérieure		15,4 % vol 33,6 % vol
Classification Ashrae		B2
Potentiel d'action sur l'ozone	(R11 = 1)	0

III.9. Propriétés chimiques et physiques de R22

Tableau III.9 : Propriétés chimiques et physiques de R22 [19].

Masse molaire	g/mol	86,47
Température de fusion	°C	-157,42
Point d'ébullition (sous 1,013 bar)	°C	-40,81
Conductivité thermique à 25 °C - Liquide - vapeur sous 1,013 bar	W/(m.K)	0,08365 0,01058
Tension de vapeur à : 25 °C 50 °C	Bar	10,44 19,43
Température critique - Pression critique - densité critique	°C bar absolu kg/m ³	96,15 49,9 523,8
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition	kJ/kg	233,7
Rigidité diélectrique à 23 °C et sous 1,013 bar		1,3
Tension de surface à 25 °C	10 ⁻³ N/m	8,08
Solubilité à 25 °C - du fluide dans l'eau sous 1,013 bar - de l'eau dans le fluide	% poids % poids	0,3 0,13
Viscosité du liquide à 25 °C	10 ⁻³ pa.s	0,1658
Chaleur massique à 25 °C - Liquide - Vapeur sous 1,013 bar	kJ/(kg.K) kJ/(kg.K)	1,257 0,662
Indice de kauri-butanol		25
Inflammabilité dans l'air		inflammable
Point éclair		néant
Classification NF-EN 378		L2
Potentiel d'action sur l'ozone	(R11 = 1)	0 ,055

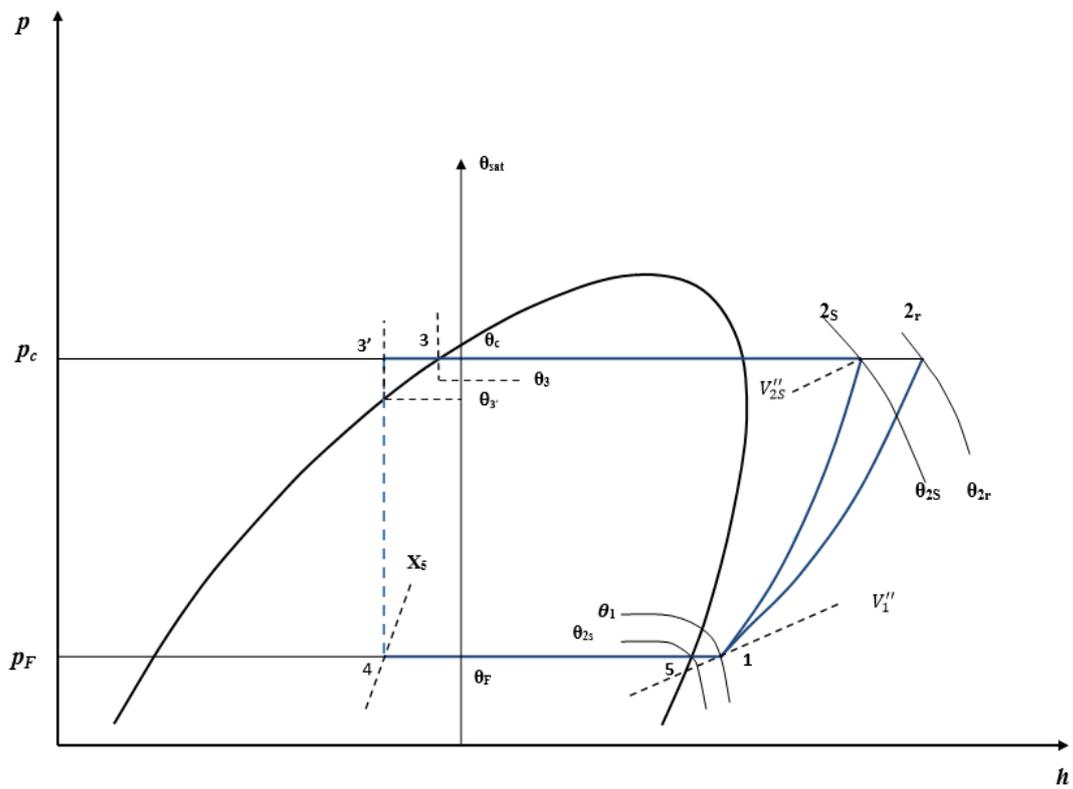


Figure IV.19 :Diagramme enthalpique de la machine frigorifique.

IV.3. Présentation de l'installation à ammoniac

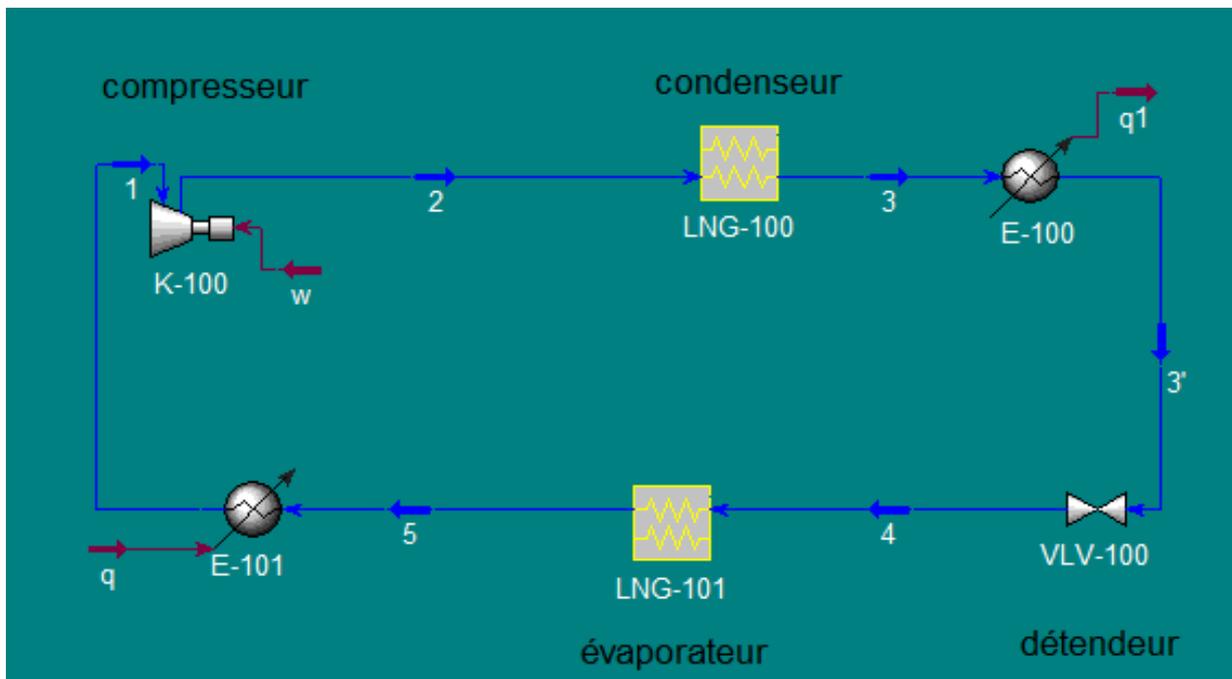


Figure IV.20 :Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple.

- **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** : la vapeur de fluide frigorigène se refroidissent (désurchauffe). Puis la vapeur de fluide frigorigène se condense qui deviennent fluide frigorigène liquide.
- **Entre 3 et 3'** : le fluide frigorigène liquide sou refroidir.
- **Entre 3' et 4** : le fluide frigorigène se vaporise partiellement, ce qui abaisse sa température.
- **Entre 4 et 5** : évaporation du fluide frigorigène liquide qui devient de vapeur de fluide frigorigène à base pression.
- **Entre 5 et 1** : surchauffe de vapeur de fluide frigorigène base pression.

IV.4. Régime de fonctionnement :

- $HP = 13,508 \text{ bar} \rightarrow \theta_k = 35 \text{ °C}$,
- $BP = 1,9019 \text{ bar} \rightarrow \theta_0 = -20 \text{ °C}$,
- 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 détendeur est de 3 °C .

IV.5. Tracé du cycle sur le diagramme des frigoristes (Figure.IV.21)

TableauIV.10 : Coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R717

Points	Température [°C]	Pression [bar]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kg K]
1	-10	1,9019	1441,3260	5,70924
2 _r	-	13,508	1917,7022	-
2 _s	117,966	13,508	1748,5887	5,70924
3	35	13,508	346,81	1,2789
3'	32	13,508	332,3604	-
4	-20	1,9019	332,3604	1,3266
5	-20	1,9019	1417,79	5,6144

IV.6. Calcul des différents points de cycle (enthalpie et entropie) :

- **Calcul de h_1 et S_1 :**

$$1.5 \text{ bar} \rightarrow 1445.49 \text{ kJ/kg}$$

$$1.9019 \text{ bar} \rightarrow h_1$$

$$2 \text{ bar} \rightarrow 1440,31 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation:

$$h_1 = 144,49 + \frac{1440,31 - 1445,49}{2 - 1,5} \cdot (1,9019 - 1,5) = 1441,326 \text{ kJ/kg}$$

$$1,5 \text{ bar} \rightarrow 5,8338 \text{ kJ/kg K}$$

$$1,9019 \text{ bar} \rightarrow S_1 \text{ kJ/kg K}$$

$$2 \text{ bar} \rightarrow 5,6781 \text{ kJ/kg K}$$

$$S_1 + S_{2s} = 5,8338 + \frac{5,6781 - 5,8338}{2 - 1,5} \cdot (1,9019 - 1,5) = 5,70924 \text{ kJ/kg K}$$

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

Pour 120 °C

$$12 \text{ bar} \rightarrow 1707,71 \text{ kJ/kg}$$

$$13,508 \rightarrow h_{x1}$$

$$14 \text{ bar} \rightarrow 1702,21 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{x2} = 1707,71 + \frac{1702,21 - 1707,71}{14 - 12} \cdot (13,508 - 12) = 1703,563 \text{ kJ/kg}$$

$$12 \text{ bar} \rightarrow 5,6620 \text{ kJ/kg k}$$

$$13,508 \text{ bar} \rightarrow S_{x1}$$

$$14 \text{ bar} \rightarrow 5,5765 \text{ kJ/kg k}$$

$$S_{x1} = 5,6620 + \frac{5,5765 - 5,6620}{14 - 12} \cdot (13,508 - 12) = 5,5975 \text{ kJ/kg K}$$

Pour 140 °C

$$12 \text{ bar} \rightarrow 1757,26 \text{ kJ/kg}$$

$$13,508 \rightarrow h_{x2}$$

$$14 \text{ bar} \rightarrow 1752,52 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{x2} = 1757,26 + \frac{1752,52 - 1757,26}{14 - 12} \cdot (13,508 - 12) = 1753,686 \text{ kJ/kg}$$

$$12 \text{ bar} \rightarrow 5,7850 \text{ kJ/kg K}$$

$$13,508 \text{ bar} \rightarrow S_{x2}$$

$$14 \text{ bar} \rightarrow 5,7013 \text{ kJ/kg K}$$

$$S_{x2} = 5,7850 + \frac{5,7013-5,7850}{14-12} \cdot (13,508 - 12) = 5,72189 \text{ kJ/kg K}$$

Donc :

$$5,5975 = S_{x1} \rightarrow 1703,563 \text{ kJ/kg}$$

$$5,70924 = S_1 = S_{2s} \rightarrow h_{2s}$$

$$5,72189 = S_{x2} \rightarrow 1753,686 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 1703,563 + \frac{1753,686-1703,563}{5,72189-5,5975} \cdot (5,70924 - 5,5975) = 1748,5887 \text{ kJ/kg}$$

T (°C)	H	S
120	1703,563	5,5975
T	1748,5887	5,70924
140	1753,686	5,7850

Donc par interpolation on trouve θ_{2s} et θ_{2r} :

$$T_{2s} = 120 + \frac{140-120}{1753,686-1703,563} \cdot (1748,5887 - 1753,686) = 117,966 \text{ °C}$$

- **Calcul de $h_{3'}$:**

$$h_{3'} \cong h_{L_{32}} + v(P_3 - P_{32})$$

$$\cong 332,17 + [1,6887 \cdot 10 - 3 \cdot (13,508 \cdot 105 - 12,308 \cdot 105)] \times 10^{-3} = 332,36 \text{ kJ/kg}$$

- **Calcul de h_3 et S_3 :**

$$32 \text{ °C} \rightarrow 332,17 \text{ kJ/kg}$$

$$35 \text{ °C} \rightarrow h_3$$

$$36 \text{ °C} \rightarrow 351,69 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 332,17 + \frac{351,69-332,17}{36-32} \cdot (35 - 32) = 346,81 \text{ kJ/kg}$$

$$32 \text{ °C} \rightarrow 1,3219 \text{ kJ/kg k}$$

$$35 \text{ °C} \rightarrow S_3$$

$$36 \text{ °C} \rightarrow 1,2946 \text{ kJ/kg k}$$

$$S_3 = 1,3219 + \frac{1,2946-1,3219}{36-32} \cdot (35 - 32) = 1,278925 \text{ kJ/kg K}$$

- **Calcul de h_4 et S_4 :**

Le point 4 c'est un mélange (liquide + vapeur) donc on calcule le titre x_4 :

$$X_4 = \frac{h_4 - h_{4\text{liq}}}{h_{4\text{vap}} - h_{4\text{liq}}} \tag{IV.1}$$

$$= \frac{332,36 - 88,68}{1417,79 - 88,68} = 0,1833$$

$$X_4 = \frac{S_4 - S_{4liq}}{S_{4vap} - S_{4liq}} \Rightarrow S_4 = X_4 \cdot (S_{4vap} - S_{4liq}) + S_{4liq}$$

$$S_4 = 0,1833 \cdot (5,6144 - 0,3642) + 0,3642 = 1,3266 \text{ kJ/kg K}$$

IV.7. Calcul des performances thermodynamiques

- **Débit du fluide frigorigène R717**

Calcul de débit massique du fluide frigorigène R717 (q_m [kg/s]) :

- **Débit volumique aspiré par le compresseur (point 1)**

$$q_{v_1} = q_m \times v_1 \quad (IV.2)$$

q_{v_1} : Débit volumique au point 1 [m^3/s]

v_1 : Volume spécifique au point 1 [m^3/kg]

Donc on aura $q_m = \frac{q_{v_1}}{v_1}$

Dans l'installation étudiée le débit volumique à l'entrée de compresseur en plein régime (100%) c'est 700 [m^3/h]

$$q_{v_1} = 700/3600 = 0,1944 \text{ [} m^3/s \text{]}$$

Dans la table thermodynamique pour NH_3 on obtient le volume spécifique au point 1 suivant :

Par interpolation

$$1,5 \text{ bar} \rightarrow 0,8336 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$1,9019 \text{ bar} \rightarrow v_1$$

$$2 \text{ bar} \rightarrow 0,61926 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_1 = 0,8336 + \frac{0,61926 - 0,8336}{2 - 1,5} \cdot (1,9019 - 1,5) = 0,6613 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Donc } q_m = \frac{q_v}{v_1} = \frac{0,1944}{0,6613} = 0,29 \text{ kg/s}$$

Rendement volumique du compresseur η_v

- **Taux de compression τ**

$$\tau = \frac{P_K}{P_0} \quad (\text{IV.3})$$

$$= \frac{13,508}{1,9019} = 7,10$$

$$\text{Donc : } \eta_v = 1 - 0,05 \times \tau \quad (\text{IV.4})$$

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times 7,10 = 0,645$$

- **Rendement indiqué η_i :**

$$\eta_i = \eta_v = 0,645$$

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

On assimile que le rendement isentropique est égal au rendement indiqué

$$\eta_{is} \simeq \eta_i$$

$$\eta_{is} = \frac{w_{thcp}}{w_{réel}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad (\text{IV.5})$$

$$h_{2r} = \frac{1}{\eta_{is}} \cdot (h_{2s} - h_1) + h_1 = \frac{1}{0,645} \cdot (1784,5884 - 1441,3260) + 1441,3260$$

$$h_{2r} = 1917,7022 \text{ kJ/kg}$$

- h_1 : Enthalpie du point 1,
- h_{2s} : Enthalpie théorique du point 2,
- h_{2r} : Enthalpie réel du point 2,

- **Puissance théorique du compresseur :**

$$P_{thcp} = q_m \cdot (h_{2s} - h_1) = 0,29 \cdot (1748,5887 - 1441,3260) = 89,1061 \text{ kW}$$

- **Travail et puissance indiqués du compresseur**

$$W_i = \frac{w_{thcp}}{\eta_i} \quad (\text{IV.6})$$

$$= \frac{307,2627}{0,645} = 476,37 \text{ kJ/kg}$$

$$P_i = \frac{P_{thcp}}{\eta_i} \quad (\text{IV.7})$$

$$= \frac{89,1061}{0,645} = 138,15 \text{ kW}$$

W_i : Travail indiquée du compresseur. [kJ/kg].

P_i : Puissance indiquée du compresseur. [kW].

η_{eff} : Rendement indiqué du compresseur.

- **La puissance effective**

$$P_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{th}}}{\eta_{\text{eff}}} \quad (\text{IV.8})$$

- P_{eff} : Puissance effective du compresseur
- η_{eff} : Rendement effectif du compresseur

Que l'on ait affaire à des compresseurs à piston ou à vis, η_{eff} passe par un maximum lorsque le taux de compression s'élève. On peut utiliser, pour les compresseurs à pistons, la relation de **dehausse** : [16]

$$\eta_{\text{eff}} = 0,8 - 0,004 \cdot (\tau - 5)^2 - \frac{0,5}{\tau - 0,3} \quad (\text{IV.9})$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0,8 - 0,004 \cdot (7,10 - 5)^2 - \frac{0,5}{7,10 - 0,3} = 0,70$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{89,1061}{0,70} = 127,2944 \text{ kW}$$

- **Puissance moteur électrique**

On majore de 20% la puissance effective calculée afin de tenir compte des surpuissances éventuelles et pour faciliter le démarrage.

$$P_{\text{elec}} = 1,2 \times P_{\text{eff}} \quad (\text{IV.10})$$

$$P_{\text{elec}} = 1,2 \times 127,2944 = 152,75 \text{ kW}$$

- **Puissance frigorifique ϕ_0 :**

$$\phi_0 = q_m \cdot (h_5 - h_4) \quad (\text{IV.11})$$

$$\phi_0 = 0,29 \cdot (1417,79 - 332,3604) = 314,7745 \text{ kW}$$

- **Puissance cédée au condenseur :**

$$\phi_k = q_m \cdot (h_{2r} - h'_3) \quad (\text{IV.12})$$

$$\phi_k = 0,29 \cdot (1917,7022 - 332,3604) = 459,749 \text{ kW}$$

- **Coefficient de performance frigorifique (COP) :**

$$COP = \frac{\phi_0}{P_{\text{eff}}} \quad (\text{IV.13})$$

$$= \frac{314,7745}{127,2944} = 2,47$$

P_{eff} : puissance effective du compresseur

ϕ_0 : puissance frigorifique

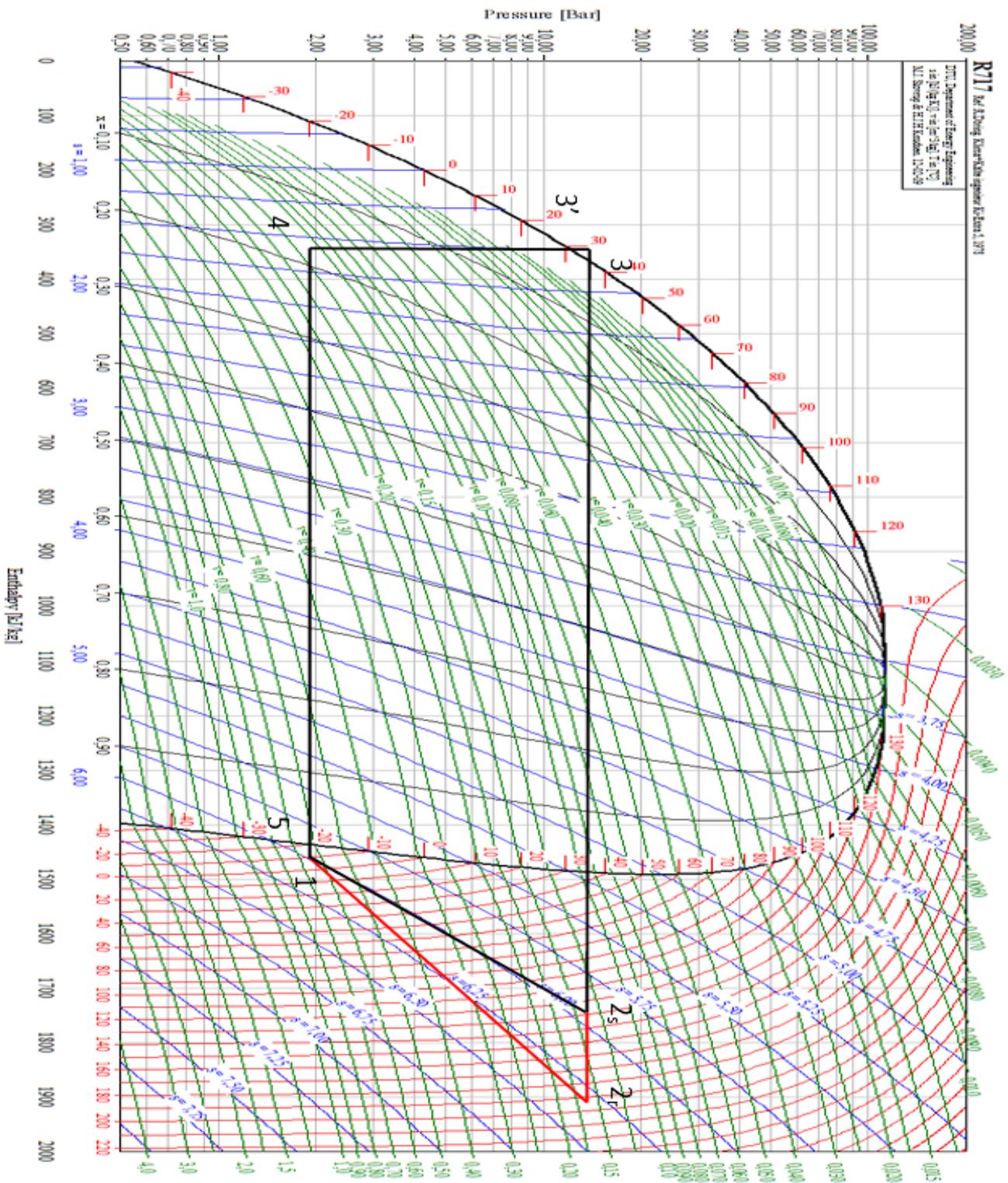


Figure IV.21 : Cycle (P-H) thermodynamique de l'installation frigorifique avec R171.

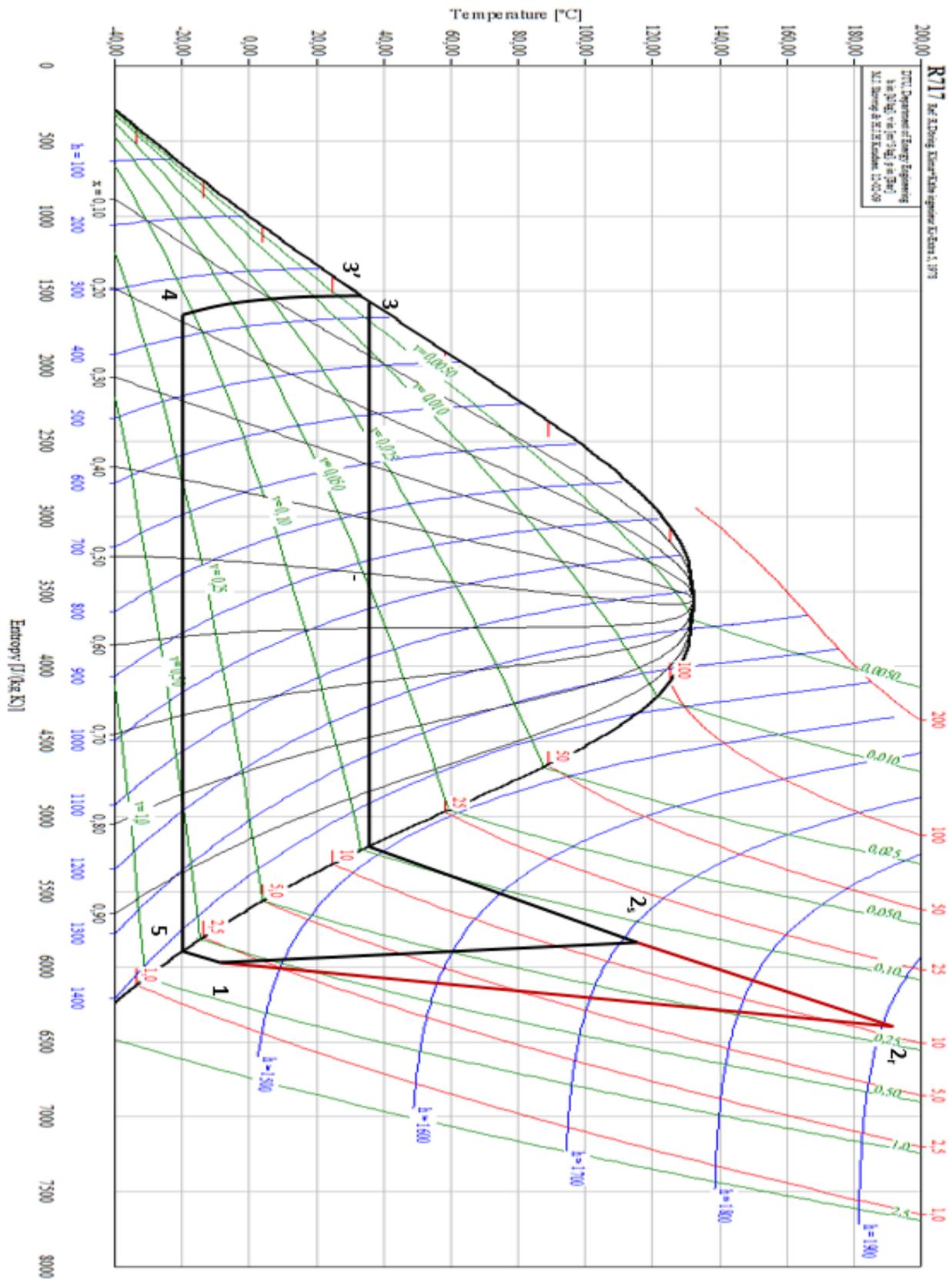


Figure IV.22 : Cycle(T-S) thermodynamique de l'installation frigorifique avec R717.

V.1. Bilan thermique de la chambre froide

Le bilan thermique de la chambre froide, nous permet de déterminer la puissance frigorifique de la machine. Cette dernière représente la quantité de froid nécessaire, d'une part, à la congélation ou le refroidissement des denrées, d'autre part à compenser les apports thermiques extérieurs et intérieurs.

V.2. Charges thermiques de la chambre froide

Les charges thermiques se répartissent en deux grandes catégories : les charges externes et les charges internes.

V.2.1. Charges thermiques externes

a- Charge thermique par conduction à travers les parois

L'écart de température entre l'enceinte à refroidir et le milieu ambiant provoque une diffusion de la chaleur à travers l'enveloppe de la chambre froide du milieu ambiant vers l'intérieur de la chambre. La quantité de chaleur apportée par conduction à travers les parois est donnée par :

$$Q_p = K. S. \Delta T. t. 10^{-3} \quad [kJ] \quad (V.1)$$

Avec :

- Q_p : Chaleur apportée par la conduction en kJ,
- K : Coefficient global d'échange thermique des parois en $W \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$,
- S : Surface totale des parois en m^2 ,
- ΔT : Ecart de température entre l'extérieure et l'intérieure de la chambre en $^\circ C$,
- t : Temps en s.

Et :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C^1] \quad (V.2) [9].$$

Avec :

- R : Résistance thermique de la paroi en $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$,
- e : Epaisseur de la paroi en m,
- λ : Conductivité thermique du matériau en $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$,
- R_{si} : Résistance superficielle interne de la paroi en $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$,
- R_{se} : Résistance superficielle externe de la paroi en $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$,
- h_i : Coefficient de transfert de chaleur par convection-rayonnement interne en $w \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$,
- h_e : Coefficient de transfert de chaleur par convection-rayonnement externe en

- **Cas d'un mur multicouche**

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}] \quad (\text{V.3}) [9].$$

- b- Charge thermique par ouverture des portes (renouvellement d'air)**

Le renouvellement d'air correspond aux ouvertures des portes de la chambre froide, constituant un apport thermique, son expression est la suivante :

$$Q_{r,a} = m_{as}(h_e^s - h_i^s) \quad [\text{kJ}] \quad (\text{V.4})$$

Avec :

- $Q_{r,a}$: Apport de chaleur dû au renouvellement d'air en kJ,
- m_{as} : Masse d'air sec entrant dans la chambre en kg air sec,
- h_e^s : Enthalpie spécifique de l'air extérieur en kJ/kg air sec,
- h_i^s : Enthalpie spécifique de l'air intérieur en kJ/kg air sec.

Il faut savoir estimer la masse d'air entrant. Pour cela, on utilise la notion de taux de renouvellement d'air (vol/h), ou nombre de renouvellements d'air par 24h (vol/j).

$$m_{as} = \frac{V_{a,e}}{V_i^s} = \frac{n_r V_{cf}}{V_i^s} \quad [\text{kg air sec}] \quad (\text{V.5})$$

Avec :

- $V_{a,e}$: Volume journalier de l'air entrant en m³,
- V_i^s : Volume spécifique de l'air intérieur en m³/kg air sec,
- V_{cf} : Volume de la chambre froide en m³,
- n_r : Nombre de renouvellement d'air en vol/j,

Le nombre de renouvellement d'air correspond au nombre de fois que le volume de la chambre est renouvelé en une journée, soient 24 heures. Il se calcule par la formule

suyvante[11] : $n_r = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}} \quad (\text{V.6})$

La courbe suivante permet d'estimer ce nombre en fonction du volume de la chambre froide :

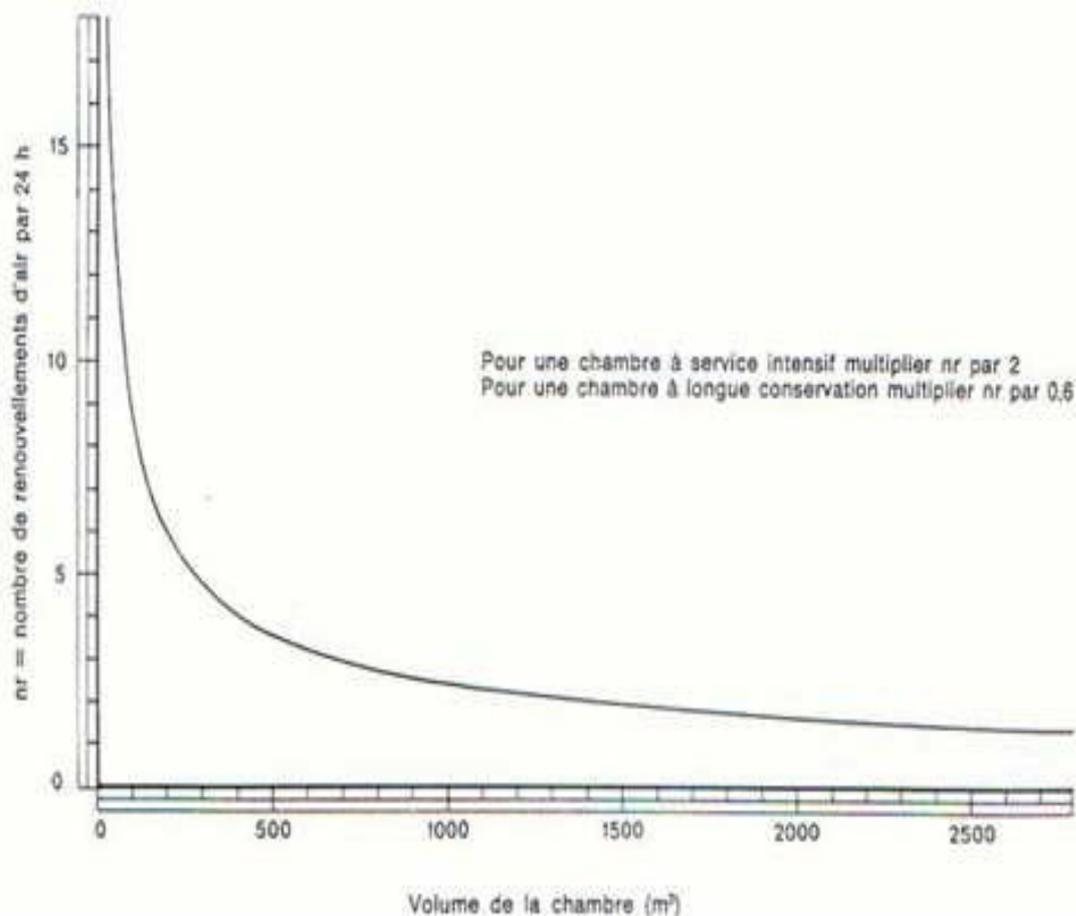


Figure V.23 : Estimation du nombre de renouvellement d'air en fonction du volume de la chambre froide [10].

V.2.2. Charges thermiques internes

a- Charge thermique due au refroidissement des denrées

La chaleur apportée par les denrées introduites dans la chambre froide est donnée par :

$$Q_d = m_d \cdot C_d (\theta_{in} - \theta_{if}) \quad [kJ] \quad (V.7)$$

Avec :

- Q_d : Apport de chaleur par les denrées en kJ,
- m_d : Masse des denrées introduite dans la chambre froide par jour en kg,
- C_d : Capacité thermique massique des denrées en kJ/kg. °C,
- θ_{in} : Température initiale des denrées (avant refroidissement) en °C,
- θ_f : Température finale des denrées égale à la température de la chambre froide en °C.

b- Charge thermique due au refroidissement des emballages

La chaleur apportée par les emballages des denrées est donnée par :

$$Q_{em} = m_{em} \cdot C_{em} (\theta_{in} - \theta_{if}) \quad [kJ] \quad (V.8)$$

Avec :

- Q_{em} : Apport de chaleur par les emballages en kJ,
- m_{em} : Masse des emballages en kg,
- C_{em} : Capacité thermique massique des emballages en kJ/kg °C,
- θ_{in} : Température initiale des emballages en °C,
- θ_f : Température finale des emballages en °C.

c- Charge thermique due aux travailleurs

L'apport de chaleur par les travailleurs est donné par :

$$Q_t = n_t \cdot P_t \cdot t \cdot 10^{-3} \quad [kJ] \quad (V.9)$$

Avec :

- Q_t : Apport de chaleur par les occupants en kJ,
- n_t : Nombre de personnes,
- P_t : Puissance par travailleur en W,
- t : Temps d'occupation en s.

Le tableau ci-dessous nous donne la puissance dégagée par un travailleur suivant la nature du travail (dur, moyen ou léger) :

Tableau V.11 :Apport calorifique des travailleurs [11].

Température de la chambre froide [°C]	Chaleur dégagé par personne et par unité de temps [W]		
	Travail dur	Travail moyen	Travail léger
-23	419	407	349
-18	407	372	326
-12	395	337	291
-7	384	314	279
0	372	270	233
2	372	267	221
4	372	256	209
7	372	250	198
10	372	244	186

d- Charge thermique due aux éclairages

La charge thermique due à l'éclairage se calcule à partir de la formule suivante :

$$Q_{éc} = n_{éc} \cdot P_{éc} \cdot t \cdot 10^{-3} \quad [kJ] \quad (V.10)$$

Avec :

- $Q_{éc}$: Apport de chaleur par l'éclairage en kJ,
- $n_{éc}$: Nombre d'éclairages,
- $P_{éc}$: Puissance de chaque éclairage en W,
- t : Durée de fonctionnement des éclairages en s.

On peut aussi calculer cette valeur en utilisant la relation suivant :

$$Q_{éc} = P_{pr} \cdot S_{pl} \cdot t \cdot 10^{-3} \quad [kJ] \quad (V.11)$$

Avec :

- P_{pr} : Charge thermique projetée sur la surface du plancher en W/m^2 ,
- S_{pl} : Surface du plancher en m^2 ,
- t : Durée de fonctionnement des éclairages en seconde.

La puissance projetée par l'éclairage est de l'ordre de 5 à 10 W/m^2 [10].

e- Charge thermique due à la ventilation

$$Q_v = n_v \cdot P_v \cdot t \cdot 10^{-3} \quad [kJ] \quad (V.12)$$

Avec :

- Q_v : Apport de chaleur par ventilation en kJ,
- n_v : Nombre de moteurs de ventilateurs,
- P_v : Puissance absorbée par les moteurs de ventilateurs en W,
- t : Temps de fonctionnement des moteurs en s.

f-Somme des charges thermiques de la chambre froide

La charge thermique totale s'obtient par l'addition des différentes charges internes et externes ainsi que les charges non chiffrables :

$$Q_{cf} = Q_p + Q_{ra} + Q_d + Q_{em} + Q_t + Q_{éc} + Q_v \quad [kJ] \quad (V.13)$$

g-Charges thermiques non chiffrables

5% à 10% du bilan provisoire (somme des apports précédents) selon le niveau d'incertitude. A intégrer à Q_{cf} calculé ci-dessus, on la note par Q_{sup} (charges thermiques supplémentaires) [10].

$$Q_{sup} = 0,05 \text{ à } 0,1 Q_{cf} \quad [kJ] \quad (V.14)$$

Finalement, la charge thermique globale de la chambre froide se calcule comme suit :

$$Q_T = Q_{cf} + Q_{sup} \quad [kJ] \quad (V.15)$$

k-Le calcul de la puissance frigorifique

La phase finale du calcul du bilan consiste à diviser la quantité d'énergie totale par le temps de fonctionnement des compresseurs pour obtenir la puissance frigorifique à installer :

$$\phi_0 = \frac{\phi_T}{t_{cf}} \quad (V.16)$$

Avec :

- ϕ_0 : Puissance frigorifique nécessaire en kW,
- ϕ_T : Charge thermique totale à extraire de la chambre froide en kJ,
- t_{cf} : Temps de fonctionnement des compresseurs en s.

V.8.Calcul des charges thermiques de la chambre froide

V.8.1. Dimensions de la chambre froide

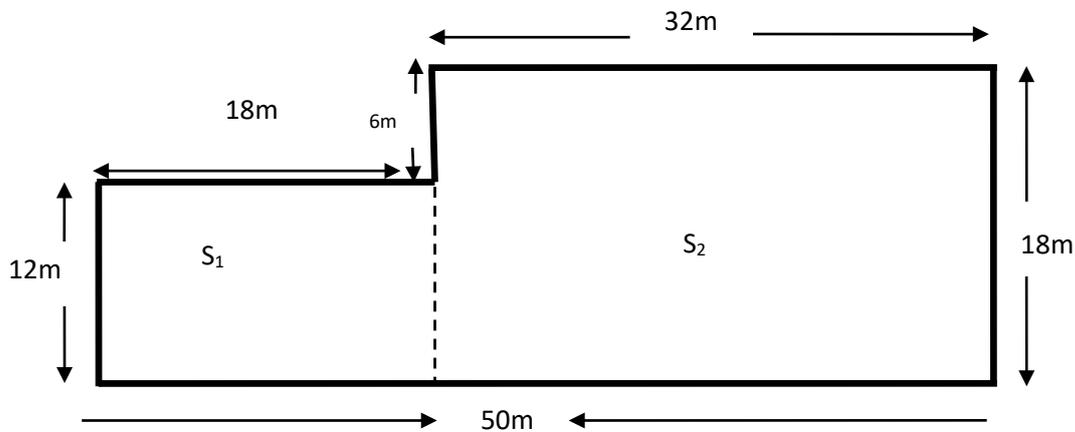


Figure V.24 :Géométrie de la chambre froide

$L_1 = 32 \text{ m}$; $l_1 = 18 \text{ m}$; $L_2 = 18 \text{ m}$; $l_2 = 12 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$, elle comporte trois portes de dimensions $l = 2,20 \text{ m}$; $H = 2,20 \text{ m}$.

Les parois verticales sont construites par une couche de panneau sandwich (polyuréthane) et une couche de parpaing, le plafond est construit par une couche de béton plein et une couche de panneau sandwich, enfin, le plancher est construit par une couche de carrelage et une couche de béton plein.

La température de refroidissement des denrées est de +15 °C et la température ambiante à l'extérieur de la chambre froide est de +35 °C.

V.9. Calcul des charges thermiques

a- Charge thermique par conduction à travers les parois :

$$Q_p = K \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ [kJ]}$$

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}} = \text{[W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

Le tableau suivant nous donne la conductivité thermique et l'épaisseur de chaque matériau utilisé :

Tableau V.12 : Conductivité thermique et épaisseur de chaque matériau utilisé

(Voir annexe A.2.1)

Matériaux	e [m]	λ [W/m . °C]
Panneau sandwich (polyuréthane)	0,08	0,04
Parpaing	0,2	0,95
Béton plein	0,1	1,75
Carrelage	0,02	2,4

Le tableau ci-dessous nous donne les résistances superficielles internes et externes des parois de la chambre froide :

Tableau V.13 : Résistances superficielles des parois [12].

Parois	$R_{si} = \frac{1}{h_i} \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$	$R_{se} = \frac{1}{h_e} \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$
Parois verticales	0,06	0,03
Parois horizontales et flux ascendant	0,09	0,05
Parois horizontales et flux descendant	0,15	0,05

- A travers les parois verticales :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,15 + \frac{0,08}{0,04} + \frac{0,2}{0,95} + 0,03} = 0,434 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

- Parois de dimensions : $L_1 = 32 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P1} = 0,434(32 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \times 10^{-3} = 143990,784 \text{ kJ}$$

- Parois de dimensions : $L_2 = 18 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P2} = 0,434(18 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \times 10^{-3} = 80994,816 \text{ kJ}$$

- Parois de dimensions : $L_3 = 50 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P3} = 0,434(50 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3} = 224985,6 \text{ kJ}$$

- Parois de dimension : $l_1 = 6 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P4} = 0,434(6 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3} = 26998,272 \text{ kJ}$$

- Parois de dimension : $l_2 = 12 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P5} = 0,434(12 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3} = 53996,544 \text{ kJ}$$

- Parois de dimension : $l_3 = 18 \text{ m}$; $H = 6 \text{ m}$

$$Q_{P6} = 0,434(18 \times 6)(35 - 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3} = 80994,816 \text{ kJ}$$

$$Q_{P \text{ tot}} = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} + Q_{P4} + Q_{P5} + Q_{P6} = 611960,32 \text{ kJ}$$

- A travers le plafond :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,15 + \frac{0,1}{1,75} + \frac{0,08}{0,04} + 0,05} = 0,443 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

On sépare le plafond en deux section deux section S_1 et S_2

$$S_1 = 32 \times 18 = 576 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 18 \times 12 = 216 \text{ m}^2$$

$$Q_{P7} = 0,443(S_1 + S_2) \cdot (35 - 15) \cdot 86400 \times 10^{-3} \\ = 0,443(576 + 216) \cdot (35 - 15) \cdot 86400 \times 10^{-3} = 606279,168 \text{ kJ}$$

- A travers le plancher :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,09 + \frac{0,02}{2,4} + \frac{0,1}{1,75} + 0,05} = 4,87 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q_{P8} = 4,87(576 + 216) \cdot (35 - 15) \cdot 86400 \times 10^{-3} = 6664965,12 \text{ kJ}$$

- A travers toute l'enveloppe de la chambre froide :

$$Q_P = Q_{P \text{ tot}} + Q_{P7} + Q_{P8} = 7883205,12 \text{ kJ}$$

b- Charge thermique due aux ouvertures des portes

$$Q_{r,a} = m_{a,s}(h_e^s - h_i^s) \quad [\text{kJ}]$$

- A l'intérieur de la chambre froide :

Pour une température $\theta_i = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité relative $\Psi = 80 \%$ le diagramme de l'air humide nous donne :

$$h_i^s = 37 \text{ kJ/kg air sec}, V_i^s = 0,83 \text{ m}^3 / \text{kg air sec.}$$

- A l'extérieur de la chambre froide :

Pour une température $\theta_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité relative $\Psi = 40 \%$ le diagramme de l'air humide nous donne :

$$h_e^s = 72 \text{ kJ/kg air sec.}$$

$$m_{as} = \frac{V_{a,e}}{V_i^s} = \frac{n_r V_{cf}}{V_i^s}$$

$$n_r = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}} = \frac{70}{\sqrt{792,6}} = 1,015$$

$$m_{as} = \frac{1,015 \times 4752}{0,83} = 5811,18 \text{ kg air sec}$$

$$Q_{r,a} = 5811,18(72 - 35) = 203391,3 \text{ kJ}$$

c- Charge thermique due au refroidissement des denrées

$$Q_d = m_d \cdot C_d(\theta_{in} - \theta_f) \quad [\text{kJ}]$$

- La masse des denrées m_d :

On calcule d'abord le nombre de palettes de la manière suivante :

$$n_{pal} = \frac{S_{pl}}{S_{pal}} k$$

Avec :

- n_{pal} : le nombre de palettes,
- S_{pl} : la surface du plancher en m^2 ,
- S_{pal} : la surface d'une palette en m^2 ,
- k : coefficient d'encombrement ($k = 0,7$).

$$n_{pal} = \frac{792}{1 \times 1,2} (0,7) = 462 \text{ palettes.}$$

La chambre froide peut contenir jusqu'à 462 palettes, chaque palette contient 60 cartons et chaque carton contient jusqu'à 40 pots de 250 g chacun, la masse des denrées peut être calculée comme suite :

$$m_d = 462 \times 40 \times 250 \times 60 \times 10^{-3} = 277200 \text{ kg}$$

la chaleur massique du la margarine et : $C_d = 1,34 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$

$$Q_d = 277200 \times 1,34 (20 - 15) = 1857240 \text{ kJ}$$

d- Charge thermique due au refroidissement des emballages

$$Q_{em} = m_{em} \cdot C_{em} \cdot (\theta_{in} - \theta_f) \text{ [kJ]}$$

$$m_{em} = 462 \times 60 \times 0,5 = 13860 \text{ kg}$$

$$C_{em} = 2,3 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} \text{ [13].}$$

$$Q_{em} = 13860 \times 2,3 (20 - 15) = 159390 \text{ kJ}$$

e- Charge thermique due aux travailleurs

$$Q_t = n_t \cdot P_t \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ [kJ]}$$

Le nombre de personnes qui travaillent dans la chambre froide est de 5 personnes et leur travail peut être classé comme étant un travail moyen, le tableau IV.1 nous donne pour une température de 15°C , une puissance dégagée par chaque travailleur $P_t = 180 \text{ W}$.

$$Q_t = 5 \times 180 \times 86400 \times 10^{-3} = 77760 \text{ kJ}$$

f- Charge thermique due aux éclairages

$$Q_{éc} = n_{éc} \cdot P_{éc} \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ [kJ]}$$

Le nombre d'éclairages est de 53 d'une puissance de 60 watt pour chacun.

$$Q_{éc} = 53 \times 60 \times 86400 \times 10^{-3} = 274752 \text{ kJ}$$

g- Charge thermique due à la ventilation

$$Q_V = n_V \cdot P_V \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ [kJ]}$$

La chambre froide contient 5 évaporateurs, chaque évaporateur contient 2 moteurs de ventilation d'une puissance de 3 kW.

$$Q_V = 5 \times 2 \times 3000 \times 86400 \times 10^{-3} = 2592000 \text{ kJ}$$

h- Somme des charges thermiques de la chambre froide

$$Q_{cf} = Q_P + Q_{ra} + Q_d + Q_{em} + Q_t + Q_{éc} + Q_V = 13047738,42 \text{ kJ}$$

i- Charges thermiques non chiffrables

$$Q_{\text{sup}} = 0,1Q_{\text{cf}} = 0,1 \times 13047738,42 = 1304773,842 \text{ kJ}$$

D'où, la charge thermique globale de la chambre froide :

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{cf}} + Q_{\text{sup}} = 14352512,26 \text{ kJ}$$

j- Calcul de la puissance frigorifique correspondante

$$\phi_0 = \frac{Q_{\text{T}}}{t_{\text{fc}}} = \frac{14352512,26}{86400} = 166,117 \text{ kW}$$

V.10. Étude thermodynamique de groupe frigorifique à R22

➤ Présentation de l'installation : R22

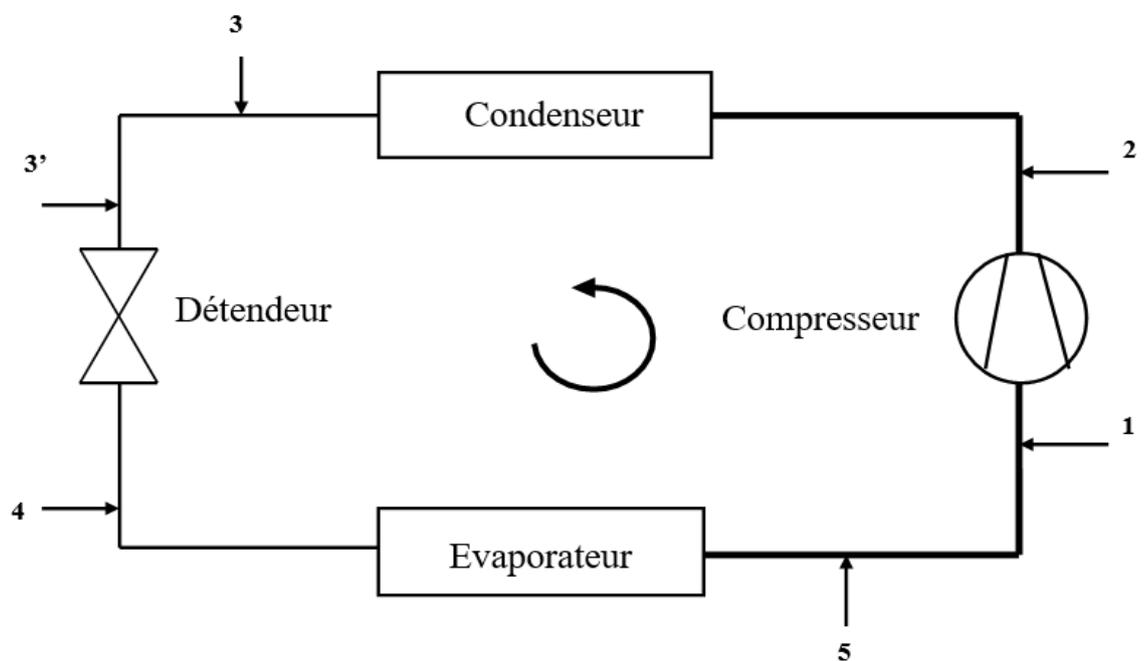


Figure V.25 : Machine à compression de vapeur formée de quatre éléments de base.

a- Le régime de fonctionnement

- HP = 12,55 bar → $\theta_k = 32 \text{ °C}$,
- BP = 4,218 bar → $\theta_0 = -5 \text{ °C}$,
- 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 détendeur est de 2 °C .

Tableau V.14 :Coordonnées thermodynamique de chaque point du cycle au R 22

Points	Température [°C]	Pression [bar]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kg K]
1	5	4,218	410,264	1,783896
2 _r	-	12,55	443,5923	1,783896
2 _s	-	12,55	438,5931	-
3	32	12,55	239,2	1,133
3'	30	12,55	236 ,6567	-
4	-5	4,218	236,6567	1,1372
5	-5	4,218	403,2	1,758

V.11.Calcul des différents points de cycle (enthalpie et entropie)

- Calcul de h_1 et S_1 :

$$4 \text{ bar} \rightarrow 410,7 \text{ kJ/kg}$$

$$4,218 \text{ bar} \rightarrow h_1$$

$$4,25 \text{ bar} \rightarrow 410,2 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$h_1 = 410,7 + \frac{410,2 - 410,7}{4,25 - 4} \cdot (4,218 - 4) = 410,264 \text{ kJ/kg}$$

$$4 \text{ bar} \rightarrow 1,790 \text{ kJ/kg k}$$

$$2,218 \text{ bar} \rightarrow S_1$$

$$4,25 \text{ bar} \rightarrow 1,783 \text{ kJ/kg k}$$

$$S_1 = S_{2s} = 1,790 + \frac{1,783 - 1,790}{4,25 - 4} \cdot (4,218 - 4) = 1,783896 \text{ kJ/kg k}$$

- Calcul de h_{2s} :

Pour 55 °C

$$12 \text{ bar} \rightarrow 435,6 \text{ kJ/kg}$$

$$12,55 \text{ bar} \rightarrow h_{x1}$$

$$13 \text{ bar} \rightarrow 434,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{x1} = 435,6 + \frac{434,1 - 435,6}{13 - 12} \cdot (12,55 - 12) = 434,775 \text{ kJ/kg}$$

$$12 \text{ bar} \rightarrow 1,778 \text{ kJ/kg k}$$

$$12,55 \text{ bar} \rightarrow S_{x1}$$

$$13 \text{ bar} \rightarrow 1,767 \text{ kJ/kg k}$$

$$S_{x1} = 1,778 + \frac{1,767 - 1,778}{13 - 12} \cdot (12,55 - 12) = 1,77195 \text{ kJ/kg k}$$

Pour 60 °C

$$12 \text{ bar} \rightarrow 439,7 \text{ kJ/kg}$$

$$12,55 \text{ bar} \rightarrow h_{x2}$$

$$13 \text{ bar} \rightarrow 438,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{x2} = 439,7 + \frac{438,3 - 439,7}{13 - 12} \cdot (12,55 - 12) = 438,39 \text{ kJ/kg}$$

$$12 \text{ bar} \rightarrow 1,719 \text{ kJ/kg k}$$

$$12,55 \text{ bar} \rightarrow S_{x2}$$

$$13 \text{ bar} \rightarrow 1,780 \text{ kJ/kg k}$$

$$S_{x2} = 1,791 + \frac{1,780 - 1,791}{13 - 12} \cdot (12,55 - 12) = 1,78495 \text{ kJ/kg k}$$

Donc :

$$1,77195 = S_{x1} \rightarrow 434,775 \text{ kJ/kg}$$

$$1,783896 = S_1 + S_{2s} \rightarrow h_{2s}$$

$$1,78495 = S_{x2} \rightarrow 438,93 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 434,775 + \frac{438,93 - 434,775}{1,78495 - 1,77195} \cdot (1,783896 - 1,77195) = 438,5931 \text{ kJ/kg}$$

T (°C)	H	S
55	434,775	1,77195
θ	438,5931	1,7838896
60	438,93	1,78495

• Calcul de $h_{3'}$:

$$h_{3'} \cong h_{l30} + v \, dP$$

$$h_{3'} \cong h_{l30} + v (P_3 - P_{30})$$

$$\cong 236,6 + [0,0009 \cdot (12,55 \cdot 10^5 - 11,92 \cdot 10^5)] \cdot 10^{-3} = 236,6567 \text{ kJ/kg}$$

On a une détente isenthalpique donc $h_{3'} = h_4$

- **Calcul de h_4 et S_4 :**

Le point 4 c'est un mélange (liquide + vapeur) donc on calcule le titre x_4 :

$$X_4 = \frac{h_4 - h_{4liq}}{h_{4vap} - h_{4liq}} = \frac{236,6567 - 194,2}{403,2 - 194,2} = 0,2031$$

$$X_4 = \frac{S_4 - S_{4liq}}{S_{4vap} - S_{4liq}} \Rightarrow S_4 = X_4 \cdot (S_{4vap} - S_{4liq}) + S_{4liq}$$

$$S_4 = 0,2013 \cdot (1,758 - 0,979) + 0,979 = 1,1372 \text{ kJ/kg k}$$

V.12. Calcul thermodynamique

T Refoulement = 5 °C : température de refoulement d'eau glacée ;

T retour = 10 °C : température de retour d'eau glacée ;

$$q_m = \rho_{eg} \times q_{veg} = 1000 \times \frac{54}{3600}$$

q_{meg} : Débit massique d'eau glacée nécessaire ;

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

ϕ_0 : Puissance frigorifique de la chambre froide ;

- **La charge frigorifique**

$$\phi_0 = C_{eau} q_{meg} \Delta T \quad (V.17)$$

Avec : $\Delta T = 5 \text{ °C}$; $C_{eau} = 4,1855 \text{ [kJ/kg. °C]}$.

$$\begin{aligned} q_{meg} &= \frac{\phi_0}{C_{eau} \cdot \Delta T} \\ &= \frac{166,117}{4,1855 \times 5} = 7,93 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

- **Débit de R 22 nécessaire**

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

$$q_{meg} \cdot C_{eg} (T_{ref} - T_{ret})_{eg} = q_{m(R22)} \cdot (h_5 - h_4) \quad (V.18)$$

Avec :

$q_m(R22)$: débit massique nécessaire ;

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

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

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

Et de la :

$$q_{m(R22)} = \frac{\phi_0}{(h_5 - h_4)} = \frac{166,117}{(403,2 - 236,6567)} = 0,99 \text{ kg/s}$$

V.12.1. Puissance mécanique du compresseur**a) Puissance théorique**

$$P_{th} = q_m(R_{22}) \cdot (h_{2th} - h_1)$$

Tel que

h_1 : l'enthalpie du point 1 ;

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

P_{th} : puissance théorique du compresseur ;

Donc :

$$P_{th} = 0,99 \cdot (438,5931 - 410,264)$$

$$P_{th} = 28,04 \text{ [kW]}$$

- **Taux de compression τ**

$$\tau = \frac{HP}{BP} = \frac{12,55}{4,218} = 2,975$$

Tel que :

HP : La pression de R_{22} à la sortie des compresseurs.

BP : La pression de R_{22} à l'entrée des compresseurs.

- **Le rendement volumétrique du compresseur**

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

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times 2,975 = 0,85$$

- **Rendement indiqué :**

$$\eta_i = \eta_v = 0,85$$



Figure V.26 :Variation du rendement volumétrique η_v en fonction de taux de compression τ [5].

V.12.2. Puissance effective absorbée par le compresseur :

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

$$\eta_{\text{eff}} = 0,8 - 0,004(\tau - 5)^2 - \frac{0,5}{\tau - 0,3}$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0,8 - 0,004(2,975 - 5)^2 - \frac{0,5}{2,975 - 0,3}$$

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

$$P_{\text{eff}} = \frac{28,04}{0,59} = 47,52 \text{ kW}$$

$$P_{\text{eff}} = 47,52 \text{ [kW]}$$

P_{eff} : puissance effective ;

P_{th} : Puissance théorique du compresseur ;

V.12.3. Le travail théorique

$$W_{\text{th}} = (h_{2s} - h_1) = (438,5931 - 410,264) = 28,3291 \text{ kJ/kg}$$

Calcul de h_{2r} :

On assimile le rendement isentropique est égale au rendement indiqué

$$\eta_{is} \approx \eta_i$$

$$\eta_{is} = \frac{P_{th\ cp}}{P_i} = \frac{h_{2th} - h_1}{h_{2r} - h_1} \Rightarrow h_{2r} = h_1 + \frac{h_{2th} - h_1}{\eta_i}$$

$$h_{2r} = 410,264 + \frac{438,5931 - 410,264}{0,85} = 443,5923 \text{ kJ/kg}$$

V.12.4. Puissance de moteur électrique

On majore de 20% la puissance effective calculée afin de tenir compte des surpuissances éventuelles et pour faciliter le démarrage.

$$P_{\text{élc}} = 1,2 \times P_{\text{eff}} = 1,2 \times 47,52 = 57,024 \text{ kW}$$

V.12.5. Chaleur et puissance cédée au condenseur**Quantité de chaleur**

$$Q_k = (h_{2r} - h'_3) = (443,5923 - 236,6567) = 206,9356 \text{ kJ/kg}$$

La puissance

$$\dot{\Phi}_k = \dot{q}_m (R_{22}) \times (h_{2r} - h'_3) = 0,99 \times (443,5923 - 236,6567) = 204,8662 \text{ kW}$$

Avec

$$h_{3'} = h_4 = 326,6567 \text{ KJ/kg (détente isenthalpique).}$$

V.12.7. Coefficient de performance COP :

$$\text{COP} = \frac{\dot{\Phi}_0}{P_{\text{eff}}} = \frac{166,117}{47,52} = 3,49$$

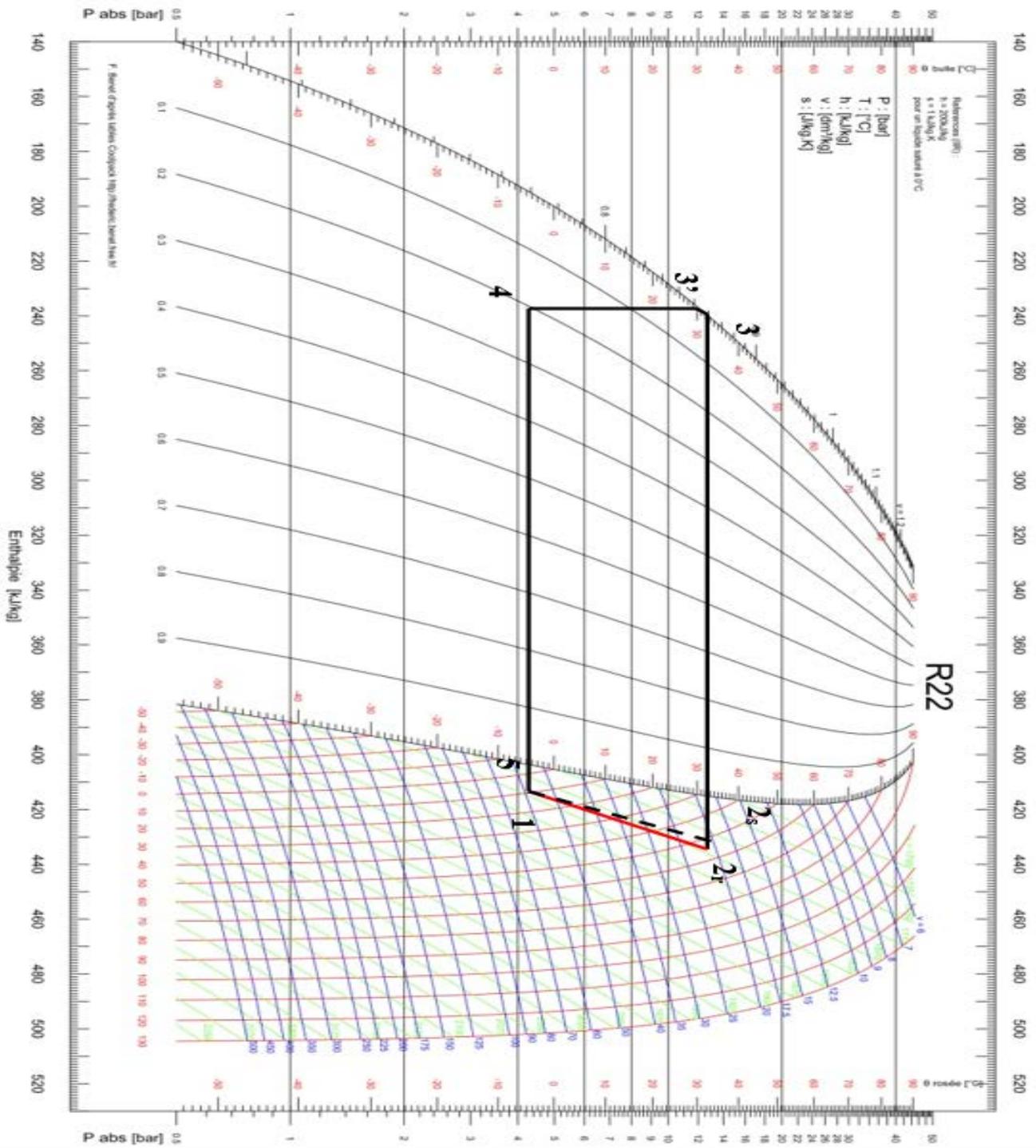


Figure V.27 : Tracer du cycle de la chambre froide sur le diagramme des frigorigères (P-H).

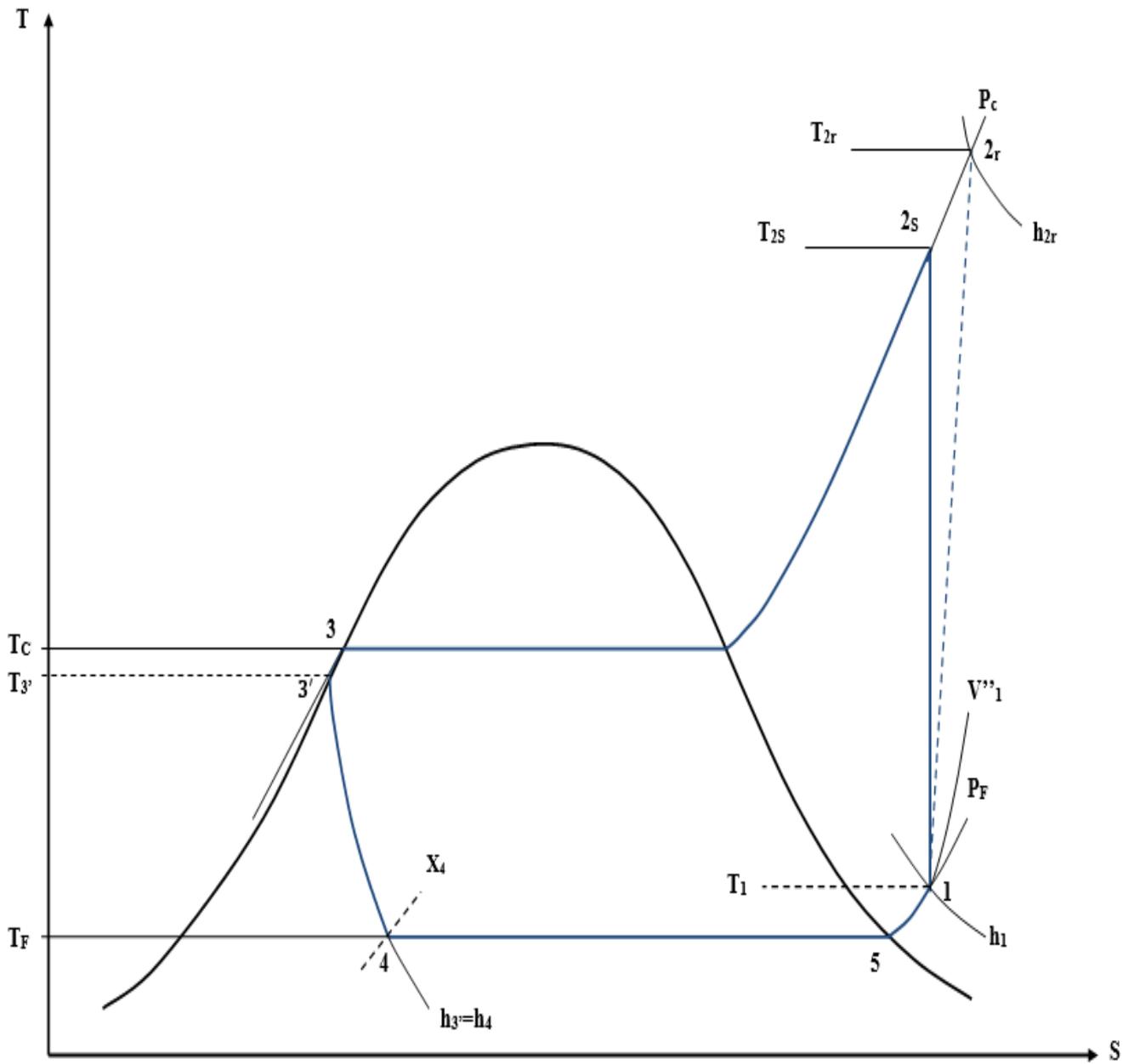


Figure V.28 :Tracer du cycle de la chambre froide sur le diagramme des frigoristes (T-S)

Conclusion Générale

Au cours de notre stage au sein de l'entreprise CO-GB LA BELLE ; nous nous sommes intéressés au fonctionnement d'installations frigorifiques de production et de stockage de la margarine, fonctionnant respectivement avec les fluides frigorigènes R717 et le R22, pour laquelle on nous a recommandé d'étudier.

Dans un premier temps une évaluation des performances énergétiques de groupe frigorifique de production de la margarine a été effectuée.

Il s'en est suivi d'une étude du bilan thermique de la chambre froide afin de quantifier la charge thermique à extraire. A l'issue de cette deuxième étude, une analyse thermodynamique de l'installation frigorifique de la chambre froide a été réalisée.

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

A. Annexes

Table 1 (continued) Freon™ 22 Saturation Properties — Temperature Table

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid H _f	Latent H _{fg}	Vapour H _g	Liquid S _f	Vapour S _g	
-46	78.9	0.0007	0.2684	1424.0	3.726	148.4	236.9	385.3	0.794	1.838	-46
-45	82.9	0.0007	0.2563	1421.0	3.901	149.4	236.4	385.8	0.799	1.835	-45
-44	87.1	0.0007	0.2450	1418.0	4.082	150.5	235.8	386.3	0.804	1.833	-44
-43	91.3	0.0007	0.2342	1416.0	4.270	151.6	235.1	386.7	0.809	1.830	-43
-42	95.8	0.0007	0.2240	1413.0	4.464	152.7	234.5	387.2	0.813	1.828	-42
-41	100.4	0.0007	0.2144	1410.0	4.665	153.8	233.9	387.7	0.818	1.825	-41
-40	105.2	0.0007	0.2052	1407.0	4.873	154.9	233.2	388.1	0.823	1.823	-40
-39	110.2	0.0007	0.1965	1404.0	5.088	156.0	232.6	388.6	0.827	1.821	-39
-38	115.4	0.0007	0.1883	1401.0	5.311	157.1	232.0	389.1	0.832	1.819	-38
-37	120.7	0.0007	0.1805	1398.0	5.541	158.2	231.3	389.5	0.837	1.816	-37
-36	126.3	0.0007	0.1730	1395.0	5.779	159.3	230.7	390.0	0.841	1.814	-36
-35	132.0	0.0007	0.1660	1392.0	6.025	160.4	230.0	390.4	0.846	1.812	-35
-34	138.0	0.0007	0.1593	1389.0	6.279	161.5	229.4	390.9	0.851	1.810	-34
-33	144.1	0.0007	0.1529	1386.0	6.541	162.6	228.7	391.3	0.855	1.808	-33
-32	150.5	0.0007	0.1468	1383.0	6.811	163.7	228.1	391.8	0.860	1.806	-32
-31	157.1	0.0007	0.1410	1380.0	7.090	164.8	227.4	392.2	0.864	1.804	-31
-30	163.9	0.0007	0.1355	1377.0	7.379	165.9	226.8	392.7	0.869	1.802	-30
-29	170.9	0.0007	0.1303	1374.0	7.676	167.0	226.1	393.1	0.873	1.800	-29
-28	178.2	0.0007	0.1253	1371.0	7.982	168.1	225.5	393.6	0.878	1.798	-28
-27	185.7	0.0007	0.1205	1368.0	8.298	169.2	224.8	394.0	0.882	1.796	-27
-26	193.4	0.0007	0.1160	1365.0	8.623	170.3	224.2	394.5	0.887	1.794	-26
-25	201.4	0.0007	0.1116	1362.0	8.958	171.4	223.5	394.9	0.891	1.792	-25
-24	209.7	0.0007	0.1075	1359.0	9.304	172.6	222.7	395.3	0.896	1.790	-24
-23	218.2	0.0007	0.1035	1356.0	9.659	173.7	222.1	395.8	0.900	1.788	-23
-22	227.0	0.0007	0.0998	1353.0	10.030	174.8	221.4	396.2	0.905	1.786	-22
-21	236.0	0.0007	0.0961	1350.0	10.400	175.9	220.7	396.6	0.909	1.784	-21
-20	245.3	0.0007	0.0927	1347.0	10.790	177.0	220.1	397.1	0.914	1.783	-20
-19	254.9	0.0007	0.0894	1343.0	11.190	178.2	219.3	397.5	0.918	1.781	-19
-18	264.8	0.0008	0.0862	1340.0	11.600	179.3	218.6	397.9	0.922	1.779	-18
-17	275.0	0.0008	0.0832	1337.0	12.020	180.4	217.9	398.3	0.927	1.777	-17
-16	285.4	0.0008	0.0803	1334.0	12.450	181.6	217.1	398.7	0.931	1.776	-16
-15	296.2	0.0008	0.0775	1331.0	12.900	182.7	216.5	399.2	0.935	1.774	-15
-14	307.3	0.0008	0.0749	1328.0	13.360	183.8	215.8	399.6	0.940	1.772	-14
-13	318.7	0.0008	0.0723	1324.0	13.830	185.0	215.0	400.0	0.944	1.771	-13
-12	330.4	0.0008	0.0699	1321.0	14.310	186.1	214.3	400.4	0.949	1.769	-12
-11	342.4	0.0008	0.0675	1318.0	14.810	187.3	213.5	400.8	0.953	1.767	-11
-10	354.8	0.0008	0.0653	1315.0	15.320	188.4	212.8	401.2	0.957	1.766	-10
-9	367.5	0.0008	0.0631	1311.0	15.850	189.6	212.0	401.6	0.962	1.764	-9
-8	380.5	0.0008	0.0610	1308.0	16.380	190.7	211.3	402.0	0.966	1.763	-8
-7	393.9	0.0008	0.0590	1305.0	16.940	191.9	210.5	402.4	0.970	1.761	-7
-6	407.7	0.0008	0.0571	1302.0	17.500	193.0	209.8	402.8	0.974	1.760	-6
-5	421.8	0.0008	0.0553	1298.0	18.090	194.2	209.0	403.2	0.979	1.758	-5
-4	436.3	0.0008	0.0535	1295.0	18.680	195.3	208.2	403.5	0.983	1.757	-4
-3	451.1	0.0008	0.0518	1292.0	19.300	196.5	207.4	403.9	0.987	1.755	-3
-2	466.4	0.0008	0.0502	1288.0	19.920	197.7	206.6	404.3	0.992	1.754	-2
-1	482.0	0.0008	0.0486	1285.0	20.570	198.8	205.9	404.7	0.996	1.752	-1
0	498.0	0.0008	0.0471	1282.0	21.230	200.0	205.0	405.0	1.000	1.751	0
1	514.4	0.0008	0.0457	1278.0	21.910	201.2	204.2	405.4	1.004	1.749	1
2	531.2	0.0008	0.0442	1275.0	22.600	202.4	203.4	405.8	1.008	1.748	2
3	548.4	0.0008	0.0429	1271.0	23.310	203.5	202.6	406.1	1.013	1.746	3
4	566.1	0.0008	0.0416	1268.0	24.040	204.7	201.8	406.5	1.017	1.745	4
5	584.1	0.0008	0.0403	1264.0	24.790	205.9	200.9	406.8	1.021	1.744	5
6	602.6	0.0008	0.0391	1261.0	25.560	207.1	200.1	407.2	1.025	1.742	6
7	621.5	0.0008	0.0380	1257.0	26.340	208.3	199.2	407.5	1.030	1.741	7

Table 1 (continued) Freon™ 22 Saturation Properties — Temperature Table

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid H _f	Latent H _{fg}	Vapour H _g	Liquid S _f	Vapour S _g	
8	640.9	0.0008	0.0368	1254.0	27.150	209.5	198.4	407.9	1.034	1.739	8
9	660.7	0.0008	0.0358	1250.0	27.970	210.7	197.5	408.2	1.038	1.738	9
10	680.9	0.0008	0.0347	1247.0	28.820	211.9	196.7	408.6	1.042	1.737	10
11	701.7	0.0008	0.0337	1243.0	29.690	213.1	195.8	408.9	1.046	1.735	11
12	722.9	0.0008	0.0327	1239.0	30.570	214.3	194.9	409.2	1.051	1.734	12
13	744.5	0.0008	0.0318	1236.0	31.480	215.5	194.0	409.5	1.055	1.733	13
14	766.7	0.0008	0.0309	1232.0	32.410	216.7	193.2	409.9	1.059	1.732	14
15	789.3	0.0008	0.0300	1229.0	33.360	217.9	192.3	410.2	1.063	1.730	15
16	812.4	0.0008	0.0291	1225.0	34.340	219.1	191.4	410.5	1.067	1.729	16
17	836.1	0.0008	0.0283	1221.0	35.340	220.4	190.4	410.8	1.071	1.728	17
18	860.2	0.0008	0.0275	1217.0	36.360	221.6	189.5	411.1	1.076	1.726	18
19	884.8	0.0008	0.0267	1214.0	37.410	222.8	188.6	411.4	1.080	1.725	19
20	910.0	0.0008	0.0260	1210.0	38.480	224.1	187.6	411.7	1.084	1.724	20
21	935.7	0.0008	0.0253	1206.0	39.570	225.3	186.6	411.9	1.088	1.722	21
22	961.9	0.0008	0.0246	1202.0	40.700	226.5	185.7	412.2	1.092	1.721	22
23	988.7	0.0008	0.0239	1198.0	41.850	227.8	184.7	412.5	1.096	1.720	23
24	1016.0	0.0008	0.0232	1195.0	43.030	229.0	183.8	412.8	1.100	1.719	24
25	1044.0	0.0008	0.0226	1191.0	44.230	230.3	182.7	413.0	1.105	1.717	25
26	1072.0	0.0008	0.0220	1187.0	45.470	231.5	181.8	413.3	1.109	1.716	26
27	1101.0	0.0009	0.0214	1183.0	46.730	232.8	180.7	413.5	1.113	1.715	27
28	1131.0	0.0009	0.0208	1179.0	48.020	234.1	179.7	413.8	1.117	1.714	28
29	1161.0	0.0009	0.0203	1175.0	49.350	235.3	178.7	414.0	1.121	1.712	29
30	1192.0	0.0009	0.0197	1171.0	50.700	236.6	177.7	414.3	1.125	1.711	30
31	1223.0	0.0009	0.0192	1167.0	52.090	237.9	176.6	414.5	1.129	1.710	31
32	1255.0	0.0009	0.0187	1163.0	53.520	239.2	175.5	414.7	1.133	1.709	32
33	1288.0	0.0009	0.0182	1158.0	54.970	240.5	174.4	414.9	1.138	1.707	33
34	1321.0	0.0009	0.0177	1154.0	56.460	241.8	173.3	415.1	1.142	1.706	34
35	1355.0	0.0009	0.0172	1150.0	57.990	243.1	172.2	415.3	1.146	1.705	35
36	1389.0	0.0009	0.0168	1146.0	59.550	244.4	171.1	415.5	1.150	1.704	36
37	1424.0	0.0009	0.0164	1142.0	61.150	245.7	170.0	415.7	1.154	1.702	37
38	1460.0	0.0009	0.0159	1137.0	62.790	247.0	168.9	415.9	1.158	1.701	38
39	1497.0	0.0009	0.0155	1133.0	64.470	248.3	167.8	416.1	1.162	1.700	39
40	1534.0	0.0009	0.0151	1129.0	66.190	249.6	166.6	416.2	1.166	1.698	40
41	1571.0	0.0009	0.0147	1124.0	67.960	251.0	165.4	416.4	1.171	1.697	41
42	1610.0	0.0009	0.0143	1120.0	69.760	252.3	164.3	416.6	1.175	1.696	42
43	1649.0	0.0009	0.0140	1115.0	71.610	253.7	163.0	416.7	1.179	1.695	43
44	1689.0	0.0009	0.0136	1111.0	73.510	255.0	161.8	416.8	1.183	1.693	44
45	1729.0	0.0009	0.0133	1106.0	75.460	256.4	160.6	417.0	1.187	1.692	45
46	1770.0	0.0009	0.0129	1101.0	77.450	257.7	159.4	417.1	1.191	1.691	46
47	1812.0	0.0009	0.0126	1097.0	79.500	259.1	158.1	417.2	1.196	1.689	47
48	1855.0	0.0009	0.0123	1092.0	81.590	260.5	156.8	417.3	1.200	1.688	48
49	1899.0	0.0009	0.0119	1087.0	83.740	261.9	155.5	417.4	1.204	1.687	49
50	1943.0	0.0009	0.0116	1082.0	85.950	263.2	154.2	417.4	1.208	1.685	50
51	1988.0	0.0009	0.0113	1077.0	88.220	264.6	152.9	417.5	1.212	1.684	51
52	2033.0	0.0009	0.0110	1072.0	90.540	266.0	151.6	417.6	1.216	1.682	52
53	2080.0	0.0009	0.0108	1067.0	92.930	267.5	150.1	417.6	1.221	1.681	53
54	2127.0	0.0009	0.0105	1062.0	95.380	268.9	148.7	417.6	1.225	1.680	54
55	2175.0	0.0010	0.0102	1057.0	97.900	270.3	147.4	417.7	1.229	1.678	55
56	2224.0	0.0010	0.0100	1052.0	100.500	271.8	145.9	417.7	1.233	1.677	56
57	2274.0	0.0010	0.0097	1047.0	103.100	273.2	144.5	417.7	1.238	1.675	57
58	2324.0	0.0010	0.0094	1041.0	105.900	274.7	142.9	417.6	1.242	1.674	58
59	2375.0	0.0010	0.0092	1036.0	108.700	276.1	141.5	417.6	1.246	1.672	59
60	2427.0	0.0010	0.0090	1030.0	111.600	277.6	139.9	417.5	1.250	1.670	60
61	2480.0	0.0010	0.0087	1025.0	114.600	279.1	138.4	417.5	1.255	1.669	61

Table 2 (continued) Freon™ 22 Superheated Vapor — Constant Pressure Tables

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	90			100			101.325			110			
	(-43.31°C)			(-41.09°C)			(-40.81°C)			(-39.04°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
(0.2375)	(386.6)	(1.831)	(0.2152)	(387.6)	(1.826)	(0.2126)	(387.8)	(1.825)	(0.1969)	(388.6)	(1.821)		
-40	0.2413	388.6	1.840	0.2164	388.3	1.829	0.2134	388.2	1.827	-	-	-	-40
-35	0.2471	391.6	1.852	0.2216	391.3	1.841	0.2186	391.3	1.840	0.2008	391.0	1.831	-35
-30	0.2528	394.6	1.865	0.2268	394.4	1.854	0.2238	394.3	1.853	0.2056	394.1	1.844	-30
-25	0.2585	397.7	1.877	0.2320	397.4	1.867	0.2289	397.4	1.865	0.2103	397.2	1.857	-25
-20	0.2642	400.8	1.890	0.2372	400.5	1.879	0.2340	400.5	1.878	0.2150	400.3	1.869	-20
-15	0.2699	403.9	1.902	0.2423	403.6	1.891	0.2390	403.6	1.890	0.2197	403.4	1.881	-15
-10	0.2755	407.0	1.914	0.2474	406.8	1.903	0.2441	406.7	1.902	0.2244	406.6	1.893	-10
-5	0.2811	410.1	1.926	0.2524	409.9	1.915	0.2491	409.9	1.914	0.2290	409.7	1.905	-5
0	0.2867	413.3	1.937	0.2575	413.1	1.927	0.2541	413.1	1.925	0.2336	412.9	1.917	0
5	0.2923	416.5	1.949	0.2625	416.3	1.938	0.2590	416.3	1.937	0.2382	416.1	1.929	5
10	0.2978	419.7	1.960	0.2676	419.5	1.950	0.2640	419.5	1.948	0.2428	419.4	1.940	10
15	0.3034	422.9	1.972	0.2726	422.8	1.961	0.2689	422.8	1.960	0.2474	422.6	1.952	15
20	0.3089	426.2	1.983	0.2776	426.0	1.972	0.2739	426.0	1.971	0.2519	425.9	1.963	20
25	0.3144	429.5	1.994	0.2826	429.3	1.984	0.2788	429.3	1.982	0.2565	429.2	1.974	25
30	0.3199	432.8	2.005	0.2875	432.7	1.995	0.2837	432.6	1.993	0.2610	432.5	1.985	30
35	0.3254	436.1	2.016	0.2925	436.0	2.006	0.2886	436.0	2.004	0.2655	435.9	1.996	35
40	0.3309	439.5	2.027	0.2974	439.4	2.016	0.2935	439.4	2.015	0.2701	439.3	2.007	40
45	0.3364	442.9	2.038	0.3024	442.8	2.027	0.2984	442.8	2.026	0.2746	442.7	2.018	45
50	0.3419	446.3	2.048	0.3073	446.2	2.038	0.3033	446.2	2.037	0.2791	446.1	2.028	50
55	0.3473	449.8	2.059	0.3123	449.7	2.048	0.3081	449.6	2.047	0.2836	449.5	2.039	55
60	0.3528	453.2	2.069	0.3172	453.1	2.059	0.3130	453.1	2.058	0.2881	453.0	2.050	60
65	0.3582	456.7	2.080	0.3221	456.6	2.069	0.3179	456.6	2.068	0.2925	456.5	2.060	65
70	0.3637	460.3	2.090	0.3270	460.2	2.080	0.3227	460.2	2.078	0.2970	460.1	2.070	70
75	0.3691	463.8	2.100	0.3319	463.7	2.090	0.3276	463.7	2.089	0.3015	463.6	2.081	75
80	0.3746	467.4	2.111	0.3368	467.3	2.100	0.3324	467.3	2.099	0.3060	467.2	2.091	80
85	0.3800	471.0	2.121	0.3417	470.9	2.110	0.3372	470.9	2.109	0.3104	470.8	2.101	85
90	0.3854	474.6	2.131	0.3466	474.5	2.120	0.3421	474.5	2.119	0.3149	474.4	2.111	90
95	0.3909	478.3	2.141	0.3515	478.2	2.130	0.3469	478.2	2.129	0.3194	478.1	2.121	95
100	0.3963	482.0	2.151	0.3564	481.9	2.140	0.3517	481.9	2.139	0.3238	481.8	2.131	100
105	0.4017	485.7	2.161	0.3613	485.6	2.150	0.3565	485.6	2.149	0.3282	485.5	2.141	105
110	0.4071	489.4	2.170	0.3662	489.3	2.160	0.3614	489.3	2.159	0.3327	489.2	2.151	110

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	120			130			140			150			
	(-37.13°C)			(-35.35°C)			(-33.67°C)			(-32.08°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
(0.1815)	(389.5)	(1.817)	(0.1684)	(390.3)	(1.813)	(0.1571)	(391.0)	(1.809)	(0.1473)	(391.8)	(1.806)		
-35	0.1834	390.8	1.822	0.1687	390.5	1.814	-	-	-	-	-	-	-35
-30	0.1878	393.9	1.835	0.1728	393.6	1.827	0.1599	393.3	1.819	0.1488	393.1	1.811	-30
-25	0.1922	397.0	1.848	0.1769	396.7	1.839	0.1637	396.5	1.831	0.1524	396.2	1.824	-25
-20	0.1965	400.1	1.860	0.1809	399.8	1.852	0.1675	399.6	1.844	0.1559	399.4	1.837	-20
-15	0.2009	403.2	1.872	0.1849	403.0	1.864	0.1713	402.8	1.856	0.1595	402.6	1.849	-15
-10	0.2052	406.4	1.884	0.1889	406.2	1.876	0.1750	406.0	1.869	0.1630	405.7	1.861	-10
-5	0.2094	409.5	1.896	0.1929	409.3	1.888	0.1787	409.2	1.881	0.1664	409.0	1.873	-5
0	0.2137	412.7	1.908	0.1969	412.6	1.900	0.1824	412.4	1.892	0.1699	412.2	1.885	0
5	0.2179	416.0	1.920	0.2008	415.8	1.912	0.1861	415.6	1.904	0.1733	415.4	1.897	5
10	0.2222	419.2	1.931	0.2047	419.0	1.923	0.1897	418.9	1.916	0.1768	418.7	1.909	10
15	0.2264	422.5	1.943	0.2086	422.3	1.935	0.1934	422.1	1.927	0.1802	422.0	1.920	15
20	0.2306	425.7	1.954	0.2125	425.6	1.946	0.1970	425.4	1.939	0.1836	425.3	1.932	20
25	0.2348	429.1	1.965	0.2164	428.9	1.957	0.2006	428.8	1.950	0.1870	428.6	1.943	25
30	0.2389	432.4	1.976	0.2202	432.2	1.968	0.2042	432.1	1.961	0.1903	432.0	1.954	30
35	0.2431	435.7	1.987	0.2241	435.6	1.979	0.2078	435.5	1.972	0.1937	435.3	1.965	35
40	0.2473	439.1	1.998	0.2279	439.0	1.990	0.2114	438.9	1.983	0.1971	438.7	1.976	40
45	0.2514	442.5	2.009	0.2318	442.4	2.001	0.2150	442.3	1.994	0.2004	442.2	1.987	45
50	0.2555	446.0	2.020	0.2356	445.9	2.012	0.2185	445.7	2.004	0.2037	445.6	1.998	50
55	0.2597	449.4	2.030	0.2394	449.3	2.023	0.2221	449.2	2.015	0.2071	449.1	2.008	55
60	0.2638	452.9	2.041	0.2433	452.8	2.033	0.2257	452.7	2.026	0.2104	452.6	2.019	60
65	0.2679	456.4	2.051	0.2471	456.3	2.044	0.2292	456.2	2.036	0.2137	456.1	2.029	65
70	0.2720	460.0	2.062	0.2509	459.9	2.054	0.2327	459.8	2.047	0.2170	459.7	2.040	70
75	0.2761	463.5	2.072	0.2547	463.4	2.064	0.2363	463.3	2.057	0.2203	463.2	2.050	75
80	0.2802	467.1	2.082	0.2585	467.0	2.074	0.2398	466.9	2.067	0.2236	466.8	2.060	80
85	0.2843	470.7	2.093	0.2623	470.6	2.085	0.2433	470.5	2.077	0.2269	470.4	2.071	85
90	0.2884	474.4	2.103	0.2660	474.3	2.095	0.2469	474.2	2.087	0.2302	474.1	2.081	90
95	0.2925	478.1	2.113	0.2698	478.0	2.105	0.2504	477.9	2.097	0.2335	477.8	2.091	95
100	0.2966	481.7	2.123	0.2736	481.6	2.115	0.2539	481.5	2.107	0.2368	481.5	2.101	100
105	0.3007	485.4	2.132	0.2774	485.3	2.125	0.2574	485.3	2.117	0.2401	485.2	2.111	105
110	0.3048	489.2	2.142	0.2812	489.1	2.134	0.2609	489.0	2.127	0.2434	488.9	2.120	110
115	0.3089	492.9	2.152	0.2849	492.8	2.144	0.2644	492.8	2.137	0.2466	492.7	2.130	115

TABLE A-13 Properties of Saturated Ammonia (Liquid-Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg·K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
-50	0.4086	1.4245	2.6265	-43.94	1264.99	-43.88	1416.20	1372.32	-0.1922	6.1543	-50
-45	0.5453	1.4367	2.0060	-22.03	1271.19	-21.95	1402.52	1380.57	-0.0951	6.0523	-45
-40	0.7174	1.4493	1.5524	-0.10	1277.20	0.00	1388.56	1388.56	0.0000	5.9557	-40
-36	0.8850	1.4597	1.2757	17.47	1281.87	17.60	1377.17	1394.77	0.0747	5.8819	-36
-32	1.0832	1.4703	1.0561	35.09	1286.41	35.25	1365.55	1400.81	0.1484	5.8111	-32
-30	1.1950	1.4757	0.9634	43.93	1288.63	44.10	1359.65	1403.75	0.1849	5.7767	-30
-28	1.3159	1.4812	0.8803	52.78	1290.82	52.97	1353.68	1406.66	0.2212	5.7430	-28
-26	1.4465	1.4867	0.8056	61.65	1292.97	61.86	1347.65	1409.51	0.2572	5.7100	-26
-22	1.7390	1.4980	0.6780	79.46	1297.18	79.72	1335.36	1415.08	0.3287	5.6457	-22
-20	1.9019	1.5038	0.6233	88.40	1299.23	88.68	1329.10	1417.79	0.3642	5.6144	-20
-18	2.0769	1.5096	0.5739	97.36	1301.25	97.68	1322.77	1420.45	0.3994	5.5837	-18
-16	2.2644	1.5155	0.5291	106.36	1303.23	106.70	1316.35	1423.05	0.4346	5.5536	-16
-14	2.4652	1.5215	0.4885	115.37	1305.17	115.75	1309.86	1425.61	0.4695	5.5239	-14
-12	2.6798	1.5276	0.4516	124.42	1307.08	124.83	1303.28	1428.11	0.5043	5.4948	-12
-10	2.9089	1.5338	0.4180	133.50	1308.95	133.94	1296.61	1430.55	0.5389	5.4662	-10
-8	3.1532	1.5400	0.3874	142.60	1310.78	143.09	1289.86	1432.95	0.5734	5.4380	-8
-6	3.4134	1.5464	0.3595	151.74	1312.57	152.26	1283.02	1435.28	0.6077	5.4103	-6
-4	3.6901	1.5528	0.3340	160.88	1314.32	161.46	1276.10	1437.56	0.6418	5.3831	-4
-2	3.9842	1.5594	0.3106	170.07	1316.04	170.69	1269.08	1439.78	0.6759	5.3562	-2
0	4.2962	1.5660	0.2892	179.29	1317.71	179.96	1261.97	1441.94	0.7097	5.3298	0
2	4.6270	1.5727	0.2695	188.53	1319.34	189.26	1254.77	1444.03	0.7435	5.3038	2
4	4.9773	1.5796	0.2514	197.80	1320.92	198.59	1247.48	1446.07	0.7770	5.2781	4
6	5.3479	1.5866	0.2348	207.10	1322.47	207.95	1240.09	1448.04	0.8105	5.2529	6
8	5.7395	1.5936	0.2195	216.42	1323.96	217.34	1232.61	1449.94	0.8438	5.2279	8
10	6.1529	1.6008	0.2054	225.77	1325.42	226.75	1225.03	1451.78	0.8769	5.2033	10
12	6.5890	1.6081	0.1923	235.14	1326.82	236.20	1217.35	1453.55	0.9099	5.1791	12
16	7.5324	1.6231	0.1691	253.95	1329.48	255.18	1201.70	1456.87	0.9755	5.1314	16
20	8.5762	1.6386	0.1492	272.86	1331.94	274.26	1185.64	1459.90	1.0404	5.0849	20
24	9.7274	1.6547	0.1320	291.84	1334.19	293.45	1169.16	1462.61	1.1048	5.0394	24
28	10.993	1.6714	0.1172	310.92	1336.20	312.75	1152.24	1465.00	1.1686	4.9948	28
32	12.380	1.6887	0.1043	330.07	1337.97	332.17	1134.87	1467.03	1.2319	4.9509	32
36	13.896	1.7068	0.0930	349.32	1339.47	351.69	1117.00	1468.70	1.2946	4.9078	36
40	15.549	1.7256	0.0831	368.67	1340.70	371.35	1098.62	1469.97	1.3569	4.8652	40
45	17.819	1.7503	0.0725	393.01	1341.81	396.13	1074.84	1470.96	1.4341	4.8125	45
50	20.331	1.7765	0.0634	417.56	1342.42	421.17	1050.09	1471.26	1.5109	4.7604	50

Ammonia

Source: Tables A-13 through A-15 are calculated based on equations from L. Haar and J. S. Gallagher, "Thermodynamic Properties of Ammonia," *J. Phys. Chem. Reference Data*, Vol. 7, 1978, pp. 635-792.

TABLE A-15 Properties of Superheated Ammonia Vapor

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
$p = 0.4 \text{ bar} = 0.04 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -50.36^\circ\text{C}$)				$p = 0.6 \text{ bar} = 0.06 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -43.28^\circ\text{C}$)				
Sat.	2.6795	1264.54	1371.72	6.1618	1.8345	1273.27	1383.34	6.0186
-50	2.6841	1265.11	1372.48	6.1652				
-45	2.7481	1273.05	1382.98	6.2118				
-40	2.8118	1281.01	1393.48	6.2573	1.8630	1278.62	1390.40	6.0490
-35	2.8753	1288.96	1403.98	6.3018	1.9061	1286.75	1401.12	6.0946
-30	2.9385	1296.93	1414.47	6.3455	1.9491	1294.88	1411.83	6.1390
-25	3.0015	1304.90	1424.96	6.3882	1.9918	1303.01	1422.52	6.1826
-20	3.0644	1312.88	1435.46	6.4300	2.0343	1311.13	1433.19	6.2251
-15	3.1271	1320.87	1445.95	6.4711	2.0766	1319.25	1443.85	6.2668
-10	3.1896	1328.87	1456.45	6.5114	2.1188	1327.37	1454.50	6.3077
-5	3.2520	1336.88	1466.95	6.5509	2.1609	1335.49	1465.14	6.3478
0	3.3142	1344.90	1477.47	6.5898	2.2028	1343.61	1475.78	6.3871
5	3.3764	1352.95	1488.00	6.6280	2.2446	1351.75	1486.43	6.4257
$p = 0.8 \text{ bar} = 0.08 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -37.94^\circ\text{C}$)				$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -33.60^\circ\text{C}$)				
Sat.	1.4021	1279.61	1391.78	5.9174	1.1381	1284.61	1398.41	5.8391
-35	1.4215	1284.51	1398.23	5.9446				
-30	1.4543	1292.81	1409.15	5.9900	1.1573	1290.71	1406.44	5.8723
-25	1.4868	1301.09	1420.04	6.0343	1.1838	1299.15	1417.53	5.9175
-20	1.5192	1309.36	1430.90	6.0777	1.2101	1307.57	1428.58	5.9616
-15	1.5514	1317.61	1441.72	6.1200	1.2362	1315.96	1439.58	6.0046
-10	1.5834	1325.85	1452.53	6.1615	1.2621	1324.33	1450.54	6.0467
-5	1.6153	1334.09	1463.31	6.2021	1.2880	1332.67	1461.47	6.0878
0	1.6471	1342.31	1474.08	6.2419	1.3136	1341.00	1472.37	6.1281
5	1.6788	1350.54	1484.84	6.2809	1.3392	1349.33	1483.25	6.1676
10	1.7103	1358.77	1495.60	6.3192	1.3647	1357.64	1494.11	6.2063
15	1.7418	1367.01	1506.35	6.3568	1.3900	1365.95	1504.96	6.2442
20	1.7732	1375.25	1517.10	6.3939	1.4153	1374.27	1515.80	6.2816
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -25.22^\circ\text{C}$)				$p = 2.0 \text{ bar} = 0.20 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -18.86^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.7787	1293.80	1410.61	5.6973	0.59460	1300.39	1419.31	5.5969
-25	0.7795	1294.20	1411.13	5.6994				
-20	0.7978	1303.00	1422.67	5.7454				
-15	0.8158	1311.75	1434.12	5.7902	0.60542	1307.43	1428.51	5.6328
-10	0.8336	1320.44	1445.49	5.8338	0.61926	1316.46	1440.31	5.6781
-5	0.8514	1329.08	1456.79	5.8764	0.63294	1325.41	1452.00	5.7221
0	0.8689	1337.68	1468.02	5.9179	0.64648	1334.29	1463.59	5.7649
5	0.8864	1346.25	1479.20	5.9585	0.65989	1343.11	1475.09	5.8066
10	0.9037	1354.78	1490.34	5.9981	0.67320	1351.87	1486.51	5.8473
15	0.9210	1363.29	1501.44	6.0370	0.68640	1360.59	1497.87	5.8871
20	0.9382	1371.79	1512.51	6.0751	0.69952	1369.28	1509.18	5.9260
25	0.9553	1380.28	1523.56	6.1125	0.71256	1377.93	1520.44	5.9641
30	0.9723	1388.76	1534.60	6.1492	0.72553	1386.56	1531.67	6.0014

TABLE A-15 (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 12.0 \text{ bar} = 1.20 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 30.94^\circ\text{C}$)								
Sat.	0.10751	1337.52	1466.53	4.9625	0.09231	1339.56	1468.79	4.9050
40	0.11287	1359.73	1495.18	5.0553	0.09432	1349.29	1481.33	4.9453
60	0.12378	1404.54	1553.07	5.2347	0.10423	1396.97	1542.89	5.1360
80	0.13387	1445.91	1606.56	5.3906	0.11324	1440.06	1598.59	5.2984
100	0.14347	1485.55	1657.71	5.5315	0.12172	1480.79	1651.20	5.4433
120	0.15275	1524.41	1707.71	5.6620	0.12986	1520.41	1702.21	5.5765
140	0.16181	1563.09	1757.26	5.7850	0.13777	1559.63	1752.52	5.7013
160	0.17072	1601.95	1806.81	5.9021	0.14552	1598.92	1802.65	5.8198
180	0.17950	1641.23	1856.63	6.0145	0.15315	1638.53	1852.94	5.9333
200	0.18819	1681.05	1906.87	6.1230	0.16068	1678.64	1903.59	6.0427
220	0.19680	1721.50	1957.66	6.2282	0.16813	1719.35	1954.73	6.1485
240	0.20534	1762.63	2009.04	6.3303	0.17551	1760.72	2006.43	6.2513
260	0.21382	1804.48	2061.06	6.4297	0.18283	1802.78	2058.75	6.3513
280	0.22225	1847.04	2113.74	6.5267	0.19010	1845.55	2111.69	6.4488
$p = 14.0 \text{ bar} = 1.40 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.26^\circ\text{C}$)								
$p = 16.0 \text{ bar} = 1.60 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 41.03^\circ\text{C}$)								
Sat.	0.08079	1340.97	1470.23	4.8542	0.07174	1341.88	1471.01	4.8086
60	0.08951	1389.06	1532.28	5.0461	0.07801	1380.77	1521.19	4.9627
80	0.09774	1434.02	1590.40	5.2156	0.08565	1427.79	1581.97	5.1399
100	0.10539	1475.93	1644.56	5.3648	0.09267	1470.97	1637.78	5.2937
120	0.11268	1516.34	1696.64	5.5008	0.09931	1512.22	1690.98	5.4326
140	0.11974	1556.14	1747.72	5.6276	0.10570	1552.61	1742.88	5.5614
160	0.12663	1595.85	1798.45	5.7475	0.11192	1592.76	1794.23	5.6828
180	0.13339	1635.81	1849.23	5.8621	0.11801	1633.08	1845.50	5.7985
200	0.14005	1676.21	1900.29	5.9723	0.12400	1673.78	1896.98	5.9096
220	0.14663	1717.18	1951.79	6.0789	0.12991	1715.00	1948.83	6.0170
240	0.15314	1758.79	2003.81	6.1823	0.13574	1756.85	2001.18	6.1210
260	0.15959	1801.07	2056.42	6.2829	0.14152	1799.35	2054.08	6.2222
280	0.16599	1844.05	2109.64	6.3809	0.14724	1842.55	2107.58	6.3207
$p = 18.0 \text{ bar} = 1.80 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 45.38^\circ\text{C}$)								
$p = 20.0 \text{ bar} = 2.00 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 49.37^\circ\text{C}$)								
Sat.	0.06445	1342.37	1471.26	4.7670				
60	0.06875	1372.05	1509.54	4.8838				
80	0.07596	1421.36	1573.27	5.0696				
100	0.08248	1465.89	1630.86	5.2283				
120	0.08861	1508.03	1685.24	5.3703				
140	0.09447	1549.03	1737.98	5.5012				
160	0.10016	1589.65	1789.97	5.6241				
180	0.10571	1630.32	1841.74	5.7409				
200	0.11116	1671.33	1893.64	5.8530				
220	0.11652	1712.82	1945.87	5.9611				
240	0.12182	1754.90	1998.54	6.0658				
260	0.12706	1797.63	2051.74	6.1675				
280	0.13224	1841.03	2105.50	6.2665				

A.1.1 : Propriétés physiques de certains corps

Nature	θ	ρ	c_p	λ	Nature	θ	ρ	c_p	λ
	°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹		°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹
Métaux, alliages et céramiques					Matériaux de construction				
Acier au carbone	20	7833	465	54	Ardoise	20	2400	879	2,2
	200			48	Basalte	20	2850	881	1,6
	600			35	Béton caverneux	20	1900	879	1,4
Acier inox 15%Cr, 10%Ni	20	7864	460	20	Béton plein	20	2300	878	1,75
Acier inox 18%Cr, 8%Ni	20	7816	460	16,3	Bitume (cartonné)	20	1050	1305	0,23
	600			22	Bois feuillus légers	20	525	3143	0,15
Acier inox 25%Cr, 20%Ni	20	7864	460	13	Bois feuillus mi-lourds	20	675	3156	0,23
Alumine	20			29	Bois feuillus très légers	20	375	3147	0,12
Aluminium	20	2707	896	204	Bois résineux légers	20	375	3147	0,12
	400			249	Bois résineux mi-lourds	20	500	3160	0,15
Argent	20	10525	234	407	Bois résineux très légers	20	375	3147	0,12
Bronze 75%Cu, 25%Sn	20	8666	343	26	Brique terre cuite	20	1800	878	1,15
Carbone	20			147	Calcaire dur	20	2450	882	2,4
Carbure de silicium	20			13	Calcaire tendre	20	1650	879	1
Chrome	20	2118	7160	449	Carrelage	20	2400	875	2,4
Constantan 60% Cu, 40%Ni	20	8922	410	22,7	Contre-plaqué okoumé	20	400	3000	0,12
Cuivre	20	8954	383,1	386	Contre-plaqué pin	20	500	3000	0,15
	400			363	Granite	20	2600	881	3
Duralumin	20	2787	883	164	Gravier (vrac)	20	1800	889	0,7
Etain	20	7304	226	64	Grès	20	2500	880	2,6
Fer	20	7870	452	73	Lave	20	2350	881	1,1
Fonte	20	7849	460	59	Marbre	20	2700	881	2,9
Laiton 70%Cu, 30%Zn	20	8522	385	111	Parquet	20	700	3143	0,2
	400			147	Plâtre	20			0,48
Magnésie	38	270		0,067	Schiste	20	2400	879	2,2
Or	20	1336	19300	129	Matériaux isolants				
Platine	20			72	Balsa	20	85		0,054
Plomb	20	11373	130	35	Copeaux bois	23			0,059
Sodium liquide	100			81,5	Coton	20	80	1300	0,06
Titane	20			16	Kapok	30			0,035
Tungstène	20	19350	134	163	Laine de roche	20	20	880	0,047
Zinc	20	7144	384	112		20	55	880	0,038
Zircone	20			4		20	135	880	0,041
Matériaux divers					Laine de verre	20	8	875	0,051
Amiante	20			0,16		20	10	880	0,045
Asphalte	20	2115	920	0,062		20	15	880	0,041
Caoutchouc (naturel)	20	1150		0,28		20	40	880	0,035
Caoutchouc (vulcanisé)	20	1100	2010	0,13	Liège expansé	20	120	2100	0,044
Carton	20	86	2030	0,048	Moquette	20	200	1300	0,06
Cuir	20	998		0,159	Polyuréthane (mousse rigide)	20	32	1300	0,03
Glace	0	920	2040	1,88		20	50	1360	0,035
Papier	20			0,48		20	85	1300	0,045
Plexiglass	20	1190	1465	0,19	PVC (mousse rigide)	20	30	1300	0,031
Sable	20	1515	800	0,2-1,0		20	40	1300	0,041
Sciure	20				Polystyrène expansé	20	12	1300	0,047
Terre mouillée	20	1900	2000	2		20	14	1300	0,043
Terre sèche	20	1500	1900	1		20	18	1300	0,041
Verre	20	2700	840	0,78		20	28	1300	0,037



DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

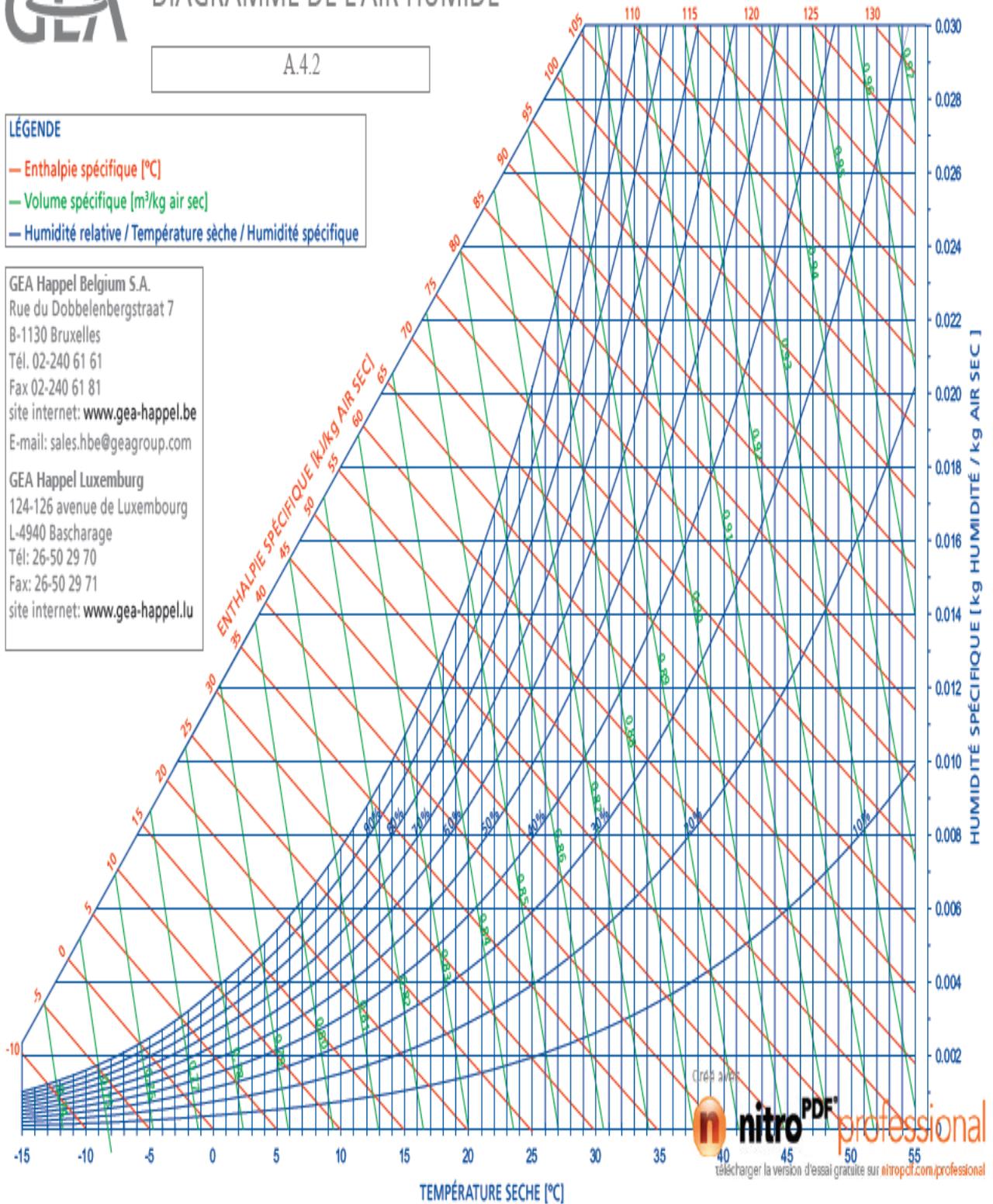
A.4.2

LÉGENDE

- Enthalpie spécifique [°C]
- Volume spécifique [m³/kg air sec]
- Humidité relative / Température sèche / Humidité spécifique

GEA Happel Belgium S.A.
 Rue du Dobbelenbergstraat 7
 B-1130 Bruxelles
 Tél. 02-240 61 61
 Fax 02-240 61 81
 site internet: www.gea-happel.be
 E-mail: sales.hbe@geagroup.com

GEA Happel Luxembourg
 124-126 avenue de Luxembourg
 L-4940 Bascharage
 Tél: 26-50 29 70
 Fax: 26-50 29 71
 site internet: www.gea-happel.lu



Références Bibliographiques

- [1] : Lucien Borel « thermodynamique et énergétique », Presses polytechnique Romande,1984
- [2] : Olivier PERROT « Cours de machine frigorifique » ; I.U.T de Saint-Omer Dunkerque ;2010 ; 2011.
- [3] : Génie Frigorifique ; « Principe de la production du froid » ; gumtn Humberg ;www.gunt.de.
- [4] : Francis Meunier, Paul Rivet, Marie-France Terrier. Froid industriel (Dunod).
- [5] : Electrotechnique le froid électrique (EDUCALIVRE) le cahier de technologie Yves g. Palau Collection a. capeliez.
- [6] : P.J.RAPIN et P.JACQUARD, installation frigorifique, Editions PYC et H.NOACK et R.SEIDEL, pratique des installations frigorifiques, Editions PYC.
- [7] : site web, Connaissances-de-base-en-principes-de-la-production-du-froid_french-1.
- [8] : Aide-mémoire AFPA AICVF ; 12/06/2017 ; «170612-RT-Pereso_Fluides-frigo-AFPA-Metzf ».
- [9] Yves JANNOT, « Transferts Thermiques », Ecole des Mines Nancy, 2011.
- [10] Flavien DAVAL, « Etude et Conception d'une Installation Frigorifique », Document Ste CLAUGER.
- [11] Jean-Pierre JARADIN, « Bilan Frigorifique », Cours de Technologie, Université de Travail (I.E.T.S. – P.S.), 2008-2009.
- [12] Patrice SEVERIN, « Traitement des Ambiances », IUFM de TOULOUSE BIOTECHNOLOGIE B.
- [13] : Fluides frigorigènes ; RPF « Marque d'information » ; DUNOD 2014 ; sur le site Web www.dunod.com .
- [14] : Les fluides frigorigènes ; «Impact environnement » ; www.energiepluslesite.be/energieplus/pag-11629.htm .
- [15] : Yvan FAYOLLE ; STE Clauger ; « Les Fluides frigorigènes » ; support N° 2 de février 2002.
- [16] :Duminil Maxime, « Théorie des Machines Frigorifiques, Machine à Compression Mécanique », Techniques de l'Ingénieur b-9 730,1996.

[17] : Maxime DUMINIL ; « Cours de production du froid » ; E.C.Paris.

[18] : Rodolphe LEBERTON ; «Risque chimique» ; ED 969.

[19] : Site web <https://climalife.dehon.fr/uploads/product/media/document/r717-fd-fr-13.pdf>