



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre : M2...../GPC/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**  
**Option : Génie chimique**

### Thème

Réfrigération à l'Ammoniac par Système Indirect.  
Application à la conservation du Lait et Dérivés

Présentés par :

- 1- Melle BOUMAIZA Houaria
- 2- Melle BOUMEZIOUD Ryma

Soutenu le 28/06/2020 devant le jury composé de :

Président :	Mr N. BOUZID	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	Mme N. BOUBEGRA	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr D. MEKHATRIA	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

# *Remerciement*

*Louange à DIEU le tout puissant, de nous avoir aidé à réaliser ce modeste projet.*

*Nous exprimons notre reconnaissance et nos remerciements à monsieur BOUZID pour avoir accepté de présider ce jury en dépit de ses obligations administratives ainsi qu'à madame HAMZAOUI pour l'honneur qu'elle nous fait en examinant ce travail avant de prendre part à ce jury.*

*Nous remercions s'adressent aussi à notre encadreur Monsieur **D. Mekhatria** pour son suivi durant la période de préparation de ce travail, son aide et ses conseils qui nous ont été précieux.*

*Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de la faculté FST Mostaganem ainsi qu'à l'ensemble du personnel du département de Génie des Procédés pour les efforts fournis afin de nous permettre d'avoir le niveau que nous avons aujourd'hui.*

*Nous tenons à témoigner notre gratitude à nos chers parents pour leurs aides morale et financières durant nos études.*

*Que tous ceux et celles qui ont contribué à nos études et ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent en ces termes toutes nos reconnaissances.*

## **Sommaire :**

INTRODUCTION GENERALE : .....	1
<b>Chapitre I : L'usage du froid dans l'agroalimentaire.</b>	
I.1.Généralités : .....	2
I.2.Le froid et l'agroalimentaire : .....	2
I.2.1. Techniques de conservation par le froid : .....	3
a) La réfrigération : .....	3
b) La congélation : .....	3
c) La surgélation : .....	4
I.2.2. Action du froid : .....	5
I.2.2.1 Action du froid sur les micro-organismes : .....	5
I.2.2.2 Action du froid sur les caractéristiques organoleptiques de l'aliment : .....	6
I.3. L'usage du froid dans la filière laitière : .....	7
I.3.1. Les objectifs du froid dans l'industrie laitière : .....	7
a) Inhibition de la flore bactérienne : .....	8
b) Transformations technologiques : .....	8
c) Action de la température : .....	9
<b>Chapitre II : la production du froid</b>	
II.1. Introduction : .....	10
II.2. Histoire des Techniques du Froid : .....	10
II.3. Modes de production du froid : .....	11
II.4. Principe de production du froid : .....	12
II.5. La machine frigorifique : .....	13
II.6. Classification des machines frigorifiques : .....	14
II.6.1.Les Machines à compression mécanique : .....	14
II.6.2. Les Machines à compression étagée : .....	15

II.6.3. Machines thermo frigorigène : .....	16
<b>Chapitre III : Implication de l'ammoniac comme fluide frigorigène</b>	
III.1. Introduction : .....	23
III.2. Généralité sur l'ammoniac : .....	23
Propriété physico-chimique : .....	23
III.3. Réfrigération indirecte à l'ammoniac : .....	24
III.4. Diagramme Enthalpique : .....	25
III.5. Exploitation du cycle frigorifique et calculs : .....	27
Échangeur thermique lait /eau : .....	28
Échangeur thermique eau /Ammoniac .....	31
Condenseur de l'ammoniac. ....	33
Conclusion générale : .....	36

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

- Figure I.1 :** l'effet de la température sur la flore bactérienne. 4
- Figure I.2 :** cristallisation de l'eau contenue dans les aliments sous l'effet de la surgélation. 4
- Figure I.3 :** les différentes températures de conservation des aliments et le comportement microbien sous l'influence du froid. 7
- Figure I.4 :** Profil de développement des bactéries lactiques en fonction de la température et du temps en (jours). 8

## Chapitre II

- Figure II.1 :** principe de la production de froid 13
- Figure II. 2:** Diagramme énergétique d'une machine frigorifique. 13
- Figure II.3:** cycle d'une machine frigorifère 14
- Figure II. 4:** principe de la machine à compression mécanique simple 15
- Figure II. 5:** Principe de la machine à absorption. 16

## Chapitre III

- Figure III. 1 :** molécule de  $\text{NH}_3$  23
- Figure III.2 :** Système de réfrigération à l'ammoniac 25
- Figure III. 3 :** diagramme Enthalpique R-717 26
- Figure III.4 :** Profil de température d'échange à contre-courant 29
- Figure III.5 :** Echangeur à plaque. 30
- Figure III.6 :** schéma fonctionnel du circuit d'eau entre l'échangeur lait /eau et l'évaporateur. 30

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

**Tableau I.1** : les paramètres recommandés pour la conservation de certains produits. 3

**Tableau I.2** : les différentes températures des levures et moisissures..... 5

## Chapitre II

**Tableau II. 1** : Températures d'ébullition de quelques fluides à la pression atmosphérique ..... 17

**Tableau II.2** : fluides frigorigènes inorganiques et leurs codes ..... 18

**Tableau II. 3** : Les principaux fluides frigorigènes et leurs codes..... 20

**Tableau II.4** : Caractéristiques de quelques fluides frigorigènes..... 22

## Chapitre III

**Tableau III.1** : principales caractéristiques physiques & chimiques de l'ammoniac .. 24

**Tableau III.2** : coordonnées des points du cycle frigorifique ..... 27

# Nomenclature

**IAA** : industrie agro-alimentaire

**LIE** : limite inférieure d'explosivité

**LES** : limite supérieure d'explosivité

**$\Phi$**  : La puissance thermique

**A** : La surface d'échange [ $m^2$ ].

**Te** : La température d'entrée du fluide, ( $^{\circ}C$ ).

**Ts** : La température de sortie du fluide, ( $^{\circ}C$ ).

**$\dot{m}$**  : Le débit massique, ( $Kg.s^{-1}$ )

**Cp** : La capacité thermique de fluide, ( $J./kg . ^{\circ}c$ )

**Tc** : La température de condensation, ( $^{\circ}C$ )

**Te** : La température de d'évaporation, ( $^{\circ}C$ )

**h** : L'enthalpie massique, ( $J.kg^{-1}$ )

**$\dot{V}$**  : Débit volumique ( $m^3 / s$ )

**U** : coefficient d'échange global ( $W/m^2 . ^{\circ}C$ )

**$\Delta T_{lm}$**  : moyenne logarithmique des températures

**$\Delta\theta$**  : Différence de température ( $^{\circ}c$ )

**$l_v$**  : chaleur latente de vaporisation ( $kJ /kg$ )

## Introduction générale

### INTRODUCTION GENERALE :

Le froid est le terme utilisé pour désigner un manque relatif de chaleur. Cependant, dans un sens plus large, c'est un moyen de conserver des aliments ou des produits pouvant être altérés et détruits par et à cause de la chaleur.

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variés (Industries agroalimentaires, médecine, confort thermique, pétrochimie...) et c'est dans l'alimentaire qu'il occupe une place prépondérante car il permet de limiter les gaspillages (pertes après récolte...) et de prolonger la durée de conservation des produits.

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

D'après l'énoncé de Clausius du second principe de la thermodynamique " La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud". Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens antinaturel, d'un milieu froid vers un milieu chaud, il faut, nécessairement, d'une part, mettre en œuvre un système thermique particulier et, d'autre part, fournir de l'énergie au système.

Lorsque le but recherché est de produire du froid, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de machine frigorifique.

Si les modes de production du froid sont très variés, certains d'entre eux se distinguent nettement des autres dans tel ou tel domaine de températures à atteindre.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude d'un système de réfrigération fonctionnant à l'ammoniac, de l'installation et le fonctionnement de l'installation frigorifique ainsi qu'au diagramme enthalpique en passant par le dimensionnement des échangeurs utilisés.

Cette étude est partagée en trois chapitres :

Le chapitre I est réservé à l'importance du froid dans la filière agroalimentaire dans la conservation des aliments, surtout la filière lait et ses dérivés.

Le chapitre II traite les techniques générales et modes de production du froid ainsi que la classification générale des machines frigorifiques et la nature des fluides frigorigènes utilisés.

Le chapitre III est consacré aux calculs et aux dimensionnements relatifs au refroidissement par système indirect du lait chaud à la sortie de la pasteurisation jusqu'à sa température de conservation et de stockage.

En fin une conclusion et des recommandations

**I.1.Généralités :**

A l'origine, la préoccupation des hommes sédentarisés était principalement de conserver les aliments en période de pléthore pour une utilisation ultérieure. La conservation des aliments évoque chez nous divers concepts ou techniques utilisés afin de protéger les aliments, d'en prolonger l'utilisation et de les stocker.

Prolonger la durée d'utilisation signifie rendre l'aliment disponible toute l'année et, par là, assurer la stabilité et la sédentarisation des populations.

Stocker l'aliment veut dire lui offrir les conditions nécessaires à la prolongation de sa durée d'utilisation sans qu'il subisse d'altération.

Avec le développement des sciences physiques, biologiques et médicales, une meilleure compréhension du monde vivant et une amélioration du niveau de vie ont conduit l'être humain à développer des méthodes de conservation et à en inventer de nouvelles, basées sur des principes scientifiques ; parmi elles l'utilisation du froid.

À la différence des autres méthodes destructives comme la déshydratation, le salage, la coagulation et la cuisson, ou encore les méthodes plus récentes comme la pasteurisation et la stérilisation, la conservation par le froid ne modifie pas les caractéristiques de l'aliment. Il constitue la première technique de conservation des aliments s'étalant de quelques jours à plusieurs mois, tout en gardant leurs propriétés gustatives et nutritives.

**I.2.Le froid et l'agroalimentaire :**

L'usage de sources de froid existe depuis toujours : la collecte et le stockage de la glace des lacs ou des rivières en hiver, pour refroidir les poissons ou les viandes, l'évaporation de l'eau de jarre d'argile pour maintenir la nourriture au frais, sont quelques exemples anciens.

Une parfaite maîtrise de la chaîne du froid est nécessaire à toutes les étapes, afin de répondre aux exigences du consommateur en matière de qualité et d'hygiène des aliments.

La maîtrise de la chaîne du froid peut avoir, par ailleurs, des retombées importantes pour les producteurs, les transporteurs et les distributeurs en :

- Economies d'énergie et de protection de l'environnement ;
- Réduction des pertes dues à la destruction de produits ayant subi des ruptures de la chaîne du froid ;
- Optimisation des investissements en équipements frigorifiques.

### I.2.1. Techniques de conservation par le froid :

En agroalimentaire, deux niveaux de températures sont considérés :

- Au-dessus du point de congélation de l'eau : c'est le froid positif ou la réfrigération dont les températures se situent, en moyenne, entre 0 °C et 10 °C.
- En dessous du point de congélation de l'eau : c'est le froid négatif ; il s'agit soit de la congélation, soit et de la surgélation suivant le mode opératoire adopté. Les températures se situent entre - 10 °C et -40°C, le plus souvent à -18°C.

#### a) La réfrigération :

C'est l'opération qui concerne l'entreposage aux basses températures positives, proche du point de congélation de l'aliment. Généralement, la température de réfrigération se situe aux alentours de 0°C car à ces températures, la vitesse de développement des microorganismes contenus dans les aliments est ralentie.

La réfrigération est utilisée pour la conservation des aliments périssables à court et moyen terme. La durée de conservation varie de quelques jours à quelques semaines suivant la nature du produit, sa température, l'humidité relative et le type de conditionnement.

Le tableau 1 illustre quelques exemples, mais il faut aussi tenir compte de la réglementation en ce domaine.

**Tableau I.1** : les paramètres recommandés pour la conservation de certains produits.

Produits	Paramètre Recommandé		
	Température de réfrigération (°C)	Humidité relative (%)	Durée de stockage en semaines
Pomme	-1 à 5	90	12 à 32 semaines
Abricot	0	90	1 à 2 semaines
Haricot vert	5 à 7	90 à 95	7 à 10 jours

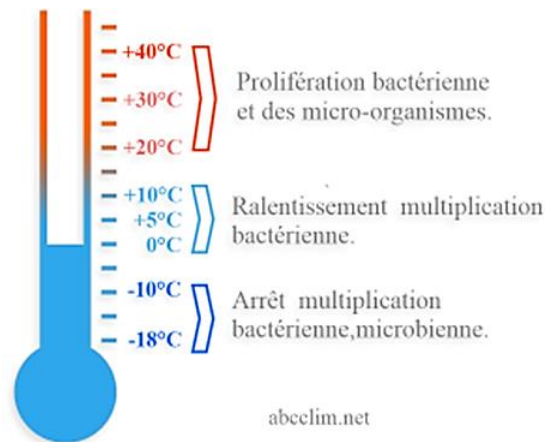
Des règles fondamentales doivent être respectées dans l'application du froid pour conserver de façon optimale les qualités du produit réfrigéré : la réfrigération doit être faite le plus tôt possible après collecte, elle doit s'appliquer à des aliments initialement **sains** et être continue tout au long de la filière de distribution (**chaîne du froid**).

#### b) La congélation :

Elle consiste à entreposer les aliments à des températures inférieures au point de congélation. Généralement, cette température est de -18°C. Elle est utilisée pour la conservation des aliments à long terme (4 à 24 mois).

Pendant la congélation, l'activité métabolique de la plupart des germes pathogènes et d'altération est inhibée. Cependant, les réactions d'altération chimique ne sont pas arrêtées

complètement. Les plus importantes de ces réactions sont l'oxydation enzymatique des lipides, l'hydrolyse des glucides et la lipolyse. Pour en remédier, les industriels procèdent généralement à un blanchiment des produits, c'est-à-dire un traitement thermique superficiel de quelques minutes à 70 °C à 100 °C destiné à détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes ou les fruits avant leur traitement ultérieur (avant la congélation).



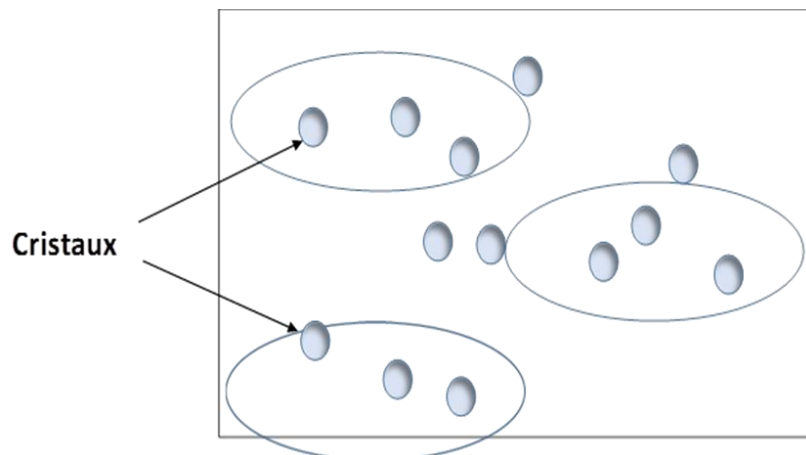
**Figure I.1 :** l'effet de la température sur la flore bactérienne.

c) **La surgélation :**

La surgélation consiste à congeler rapidement une denrée saine et en parfait état de fraîcheur, en abaissant sa température très rapidement jusqu'à -50° C ensuite elle subit une conservation entre -18 et -24°C.

Grâce à ce procédé, l'eau contenue dans les cellules se cristallise finement limitant ainsi la destruction cellulaire. Les produits ainsi traités conservent leur texture, leur saveur et peuvent être conservés plus longtemps.

Au cours du stockage ou du transport, la température ne doit varier.



**Figure I.2 :** cristallisation de l'eau contenue dans les aliments sous l'effet de la surgélation.

### I.2.2. Action du froid :

Le froid doit son pouvoir de conservation à deux effets :

Un effet thermique qui affaiblit la cinétique *des* réactions biologiques de développement des microorganismes ainsi que celle des réactions biochimiques et enzymatiques qui nuisent à la qualité des aliments.

Un second effet encore plus puissant dû à *l'abaissement de l'activité de l'eau* qui se cristallise et devient indisponible pour toutes les réactions biologiques, chimiques et enzymatiques ; c'est pourquoi la congélation/surgélation permet des durées de conservation beaucoup plus longues que la réfrigération.

#### I.2.2.1 Action du froid sur les micro-organismes :

Le froid ne tue pas les micro-organismes, il ralentit leur développement en les inhibant. Cependant certains microbes résistent au froid comme les psychotrophes, psychrophiles et cryophiles.

Les levures et les moisissures, en particulier, se complaisent dans des ambiances froides et humides comme le montre le tableau.

**Tableau I.2 :** les différentes températures des levures et moisissures.

Nom de groupe	Température (moyenne) minimum	Plage de température optimum	Température maximum	Exemples
Psychrophiles ou cryophiles	-10 °C	+4 °C à +10 °C	+20 °C	Pseudomonas levures, moisissures
Psychotrophes	+3 °C	+20 °C à +30 °C	+35°C	Yersini-enterocolitica, listeria, erwinya
Mésophiles	+15 °C	+30 °C à +37 °C	+50 °C	Escherichia celi
Thermophiles	+30 °C	+45 °C à +55 °C	+65 °C	Bocillustearothermophilus

Ce tableau montre qu'il y a 3 domaines de température où la conservation est optimale :

- A + 3 °C : fin des risques dus aux bactéries pathogènes et toxigènes.
- A - 10 °C : arrêt de toute multiplication bactérienne.
- A - 18 °C : arrêt de toute multiplication microbienne y compris levures et moisissures.

**I.2.2.2 Action du froid sur les caractéristiques organoleptiques de l'aliment :**

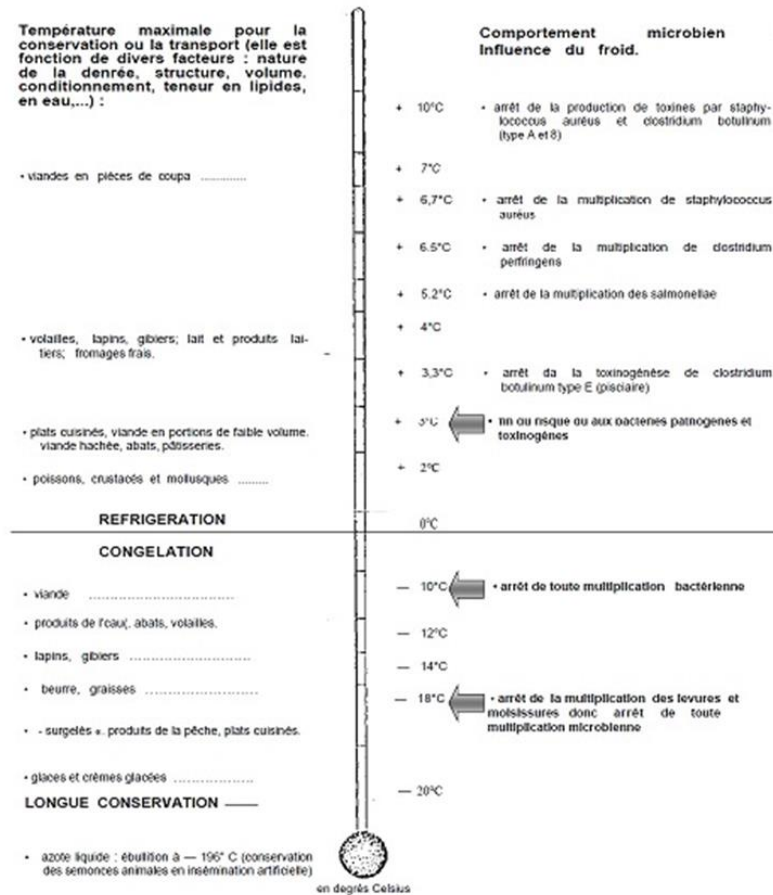
Les modifications vont dépendre du traitement et de la denrée.

**En congélation :**

Les modifications sont importantes car il y a un changement d'état, c'est-à-dire passage vers l'état solide. Les conséquences du froid négatif ne seront perceptibles que lors de la décongélation.

Les modifications en congélation sont :

- Augmentation du volume, qui reste fonction de la quantité d'eau présente.
- Détérioration des cellules par formation de cristaux de glaces au cœur de la cellule.
- Formation de givre
- Détériorations biochimiques qui causent :
  - Rancissement des matières grasses.
  - Dégradation des pigments colorés
  - Apparition de saveurs désagréables par oxydation.
  - Apparition de taches brunes sur certains végétaux.



**Figure I.3 :** les différentes températures de conservation des aliments et le comportement microbien sous l'influence du froid.

#### En réfrigération :

Les modifications sont minimales mais observables

### **I.3. L'usage du froid dans la filière laitière :**

Dans la filière laitière, la chaîne de froid joue un rôle incontournable depuis la traite à la ferme jusqu'à la consommation, en passant par la collecte et la transformation. En effet, pour assurer la stabilité de la qualité du lait, la chaîne de froid doit être appliquée sans interruption à tous les niveaux de la filière

L'utilisation du froid dans l'industrie laitière sert autant pour les traitements que pour la conservation par rapport aux autres industries alimentaires

#### **I.3.1. Les objectifs du froid dans l'industrie laitière :**

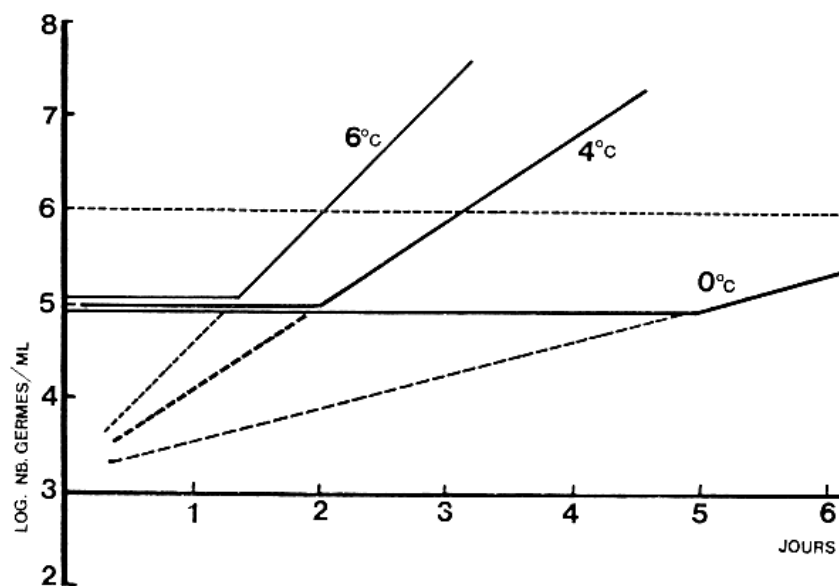
Trois objectifs sont considérés :

### a) Inhibition de la flore bactérienne :

C'est de bloquer le développement de la flore bactérienne qui se dissémine facilement et rapidement dans le lait du fait de son état liquide. En raison de la température du lait (37°C), de sa teneur élevée en eau (87,5%), de ses éléments nutritifs et de son pH proche de la neutralité (6,6 à 6,8) de nombreuses bactéries y trouvent des conditions favorables à leur développement.

Après pasteurisation, pour garantir l'inhibition totale de la flore bactérienne, le lait subit un refroidissement brusque de 60°C ou 100°C jusqu'à +4°C.

Dès que la température est abaissée au voisinage de 10°C la croissance de certains microorganismes est fortement ralentie et s'arrête à 4°C, cas des bactéries lactiques, responsables de la production de l'acide lactique (figure 1.4).



**Figure I.4 :** Profil de développement des bactéries lactiques en fonction de la température et du temps en (jours).

### b) Transformations technologiques :

Ce sont, entre autres :

a) la cessation de surfusion des crèmes pasteurisées, avant ou après ensemencement et maturation.

b) la congélation, pour assurer la texture et la présentation définitive, la conservation des glaces, crèmes glacées et analogues,

c) la participation au renversement du sens de l'émulsion que constitue le barattage ; c' Il est même nécessaire d'opérer un refroidissement antérieur des crèmes utilisées : 3 h à + 7° C- 8° C pour les crèmes à 35 p. 100 de matière grasse et acidifiées à pH 4,5 - 5,6 à 12 h, pour les crèmes douces

**c) Action de la température :**

Concurremment avec la chaleur ou la ventilation selon les cas, c'est de maintenir une température pendant un temps voulu, de climatiser des locaux tels que hâloirs et caves d'affinage. Se pose, aussi, parallèlement, le maintien, parfois, d'une certaine humidité relative. Le tout a pour corollaire de diriger des actions microbiennes par action sur le milieu environnant.

## II.1. Introduction :

La réfrigération est l'ensemble de procédés pour abaisser la température dans un espace clos pour conserver les produits. Cette technologie est l'une des plus utilisées dans divers secteurs (agroalimentaire, médical, Laboratoires d'essai et de recherche...). Pour cela il faut un système pour produire le froid et une installation pour le maintien du milieu à température finale basse qui reste fonction de l'utilisation.

Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique qui régissent les échanges de chaleur lors de changements de phase entre états liquides et gazeux de fluides *réfrigérants*.

## II.2. Histoire des Techniques du Froid :

La maîtrise du froid par l'homme est une technique récente.

L'homme savait utiliser le froid qu'offre la nature depuis des millénaires en stockant dans des grottes ou des glacières de la glace prélevée en hiver pour l'utiliser plus tard. On savait également depuis longtemps que l'ajout de sel ou de salpêtre abaisse la température de la glace et permet la préparation de sorbets refroidis dans ce mélange réfrigérant.

En 1756, William Cullen donna la première démonstration publique d'un processus artificiel de refroidissement. Cullen utilisait une pompe afin de créer un vide dans un contenant rempli d'éther. En retirant de la chaleur de son environnement, il commença à bouillir ce qui mena à la formation de glace. Ce processus ne connut pas d'application commerciale. Pas à pas, la technique de refroidissement évolua mais resta longtemps au niveau de l'expérimentation individuelle.

En 1834, l'américain Jacob Perkins invente une machine à compression de vapeur, en cycle fermé, en utilisant comme fluide frigorigène l'éthyle éther où un seul prototype fut construit. Une vingtaine d'années plus tard, l'écossais James Harrison, dépose un brevet sur une idée très proche en utilisant le même fluide frigorigène : l'éthyle éther. Ce fluide est inflammable et toxique et reste l'unique fluide utilisé dans les machines à compression fabriquées jusqu'à la fin du 19e siècle.

C'est seulement en 1869 que Charles Tellier développa la première installation pouvant servir à conserver les aliments. Vers les années 1920, une machine à absorber le froid est inventée en Suède, ce qui constitue une grande avancée technologique.

En 1922, un modèle, composé d'une caisse en bois, d'un compresseur refroidi à l'eau et d'une feuille pour conserver la glace, est lancé sur le marché ; c'est le frigo. Il est vendu pour la somme de 714 dollars. À l'époque une voiture de marque Ford Model T coûtait 450 dollars, ce qui représente la moitié du prix du frigo.

La prédominance de l'ammoniac dans les machines à compression dura jusqu'en 1930. A cette date, trois chercheurs mettent au point des fluides frigorigènes de type hydrocarbures halogénés dont le nom commercial sera "Fréon". Thomas Migley, Albert Leon Henne et Robert R. Mc Nary travaillaient alors dans les laboratoires de la société Frigidaire à Dayton (Ohio). La production industrielle de R12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) en 1931 puis celle du R11, R114, R113, R22 en 1936 fut réalisée par la société Kinetic Chemical Inc à Wilmington (Delaware). Ces fluides frigorigènes dérivant du méthane et de l'éthane dominèrent tous les secteurs de la réfrigération pendant quarante années alors que l'ammoniac restait le fluide adapté aux machines industrielles de grosse puissance.

### II.3. Modes de production du froid :

Toutes transformations endothermiques dans un milieu peuvent constituer un procédé à produire du froid. Ces transformations peuvent être :

- Sublimation d'un solide (cas du CO<sub>2</sub>)
- Détente d'un gaz comprimé
- Fusion d'un corps solide
- Refroidissement thermoélectrique
- Dissolution de certains sels
- Désaimantation adiabatique
- Vaporisation d'un liquide en circuit fermé

La sublimation par absorption de chaleur reste un procédé d'obtention du froid. Le cas le plus courant est celui du CO<sub>2</sub> qui, à la pression atmosphérique, a une température de sublimation de -78.9°C.

La fusion d'un liquide solidifié pur se fait à température constante par absorption de la chaleur latente de fusion. Ce procédé discontinu bien que simple présente l'inconvénient de nécessiter une congélation préalable.

Le refroidissement thermoélectrique (effet Peltier) est utilisé pour produire de très petites quantités de froid. Il consiste à faire passer un courant continu dans un thermocouple, conducteurs de natures différentes reliés alternativement par des ponts de cuivre.

La dissolution d'un sel dans l'eau provoque un abaissement de température de la solution. C'est ainsi que le mélange de neige (4 parties) et de potasse (3 parties) fait baisser la température de la solution jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La désaimantation adiabatique, réorganisation du cortège électronique d'un corps, permet l'obtention de très basses températures ( $10^{-2}$  à  $10^{-6}$  K).

La vaporisation d'un liquide produit du froid par absorption de chaleur à travers un échangeur (évaporateur). La vapeur produite est liquéfiée dans un autre échangeur (condenseur), c'est ce qui décrit le un cycle au sein d'une machine fonctionnant de manière continue.

#### II.4. Principe de production du froid :

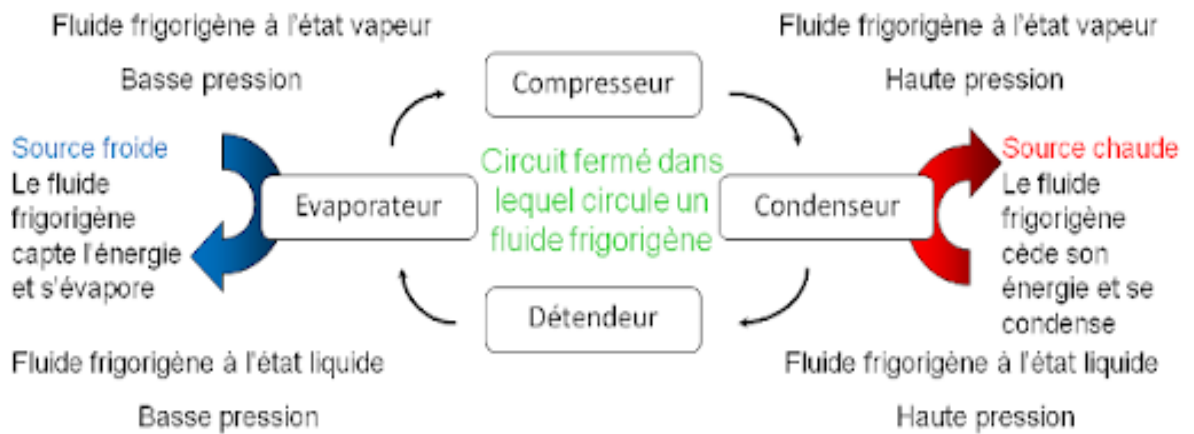
Le principe de base de la production du froid consiste à prélever de la chaleur d'un milieu à refroidir, appelé source chaude, et à la transférer vers un milieu extérieur pour le réchauffer (source froide).

Ce transfert d'énergie est réalisé par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène soumis en continu à un cycle thermodynamique de succession de changements d'états vapeur/liquide.

Le cycle comporte quatre phases qui sont :

- La Compression : réalisée par un compresseur qui aspire, comprime et refoule le fluide frigorigène vers le condenseur. La température et la pression du fluide sont élevées.
- La Condensation : qui transforme graduellement le gaz en liquide, dans condenseur, par échange de chaleur avec l'air ou l'eau.
- La Détente : le fluide sous forme liquide se détend par abaissement brusque de la pression à travers du détendeur.
- L'Évaporation : en passant dans un évaporateur situé au contact du milieu à refroidir, le liquide se vaporise et redevient gaz et retourne au compresseur.

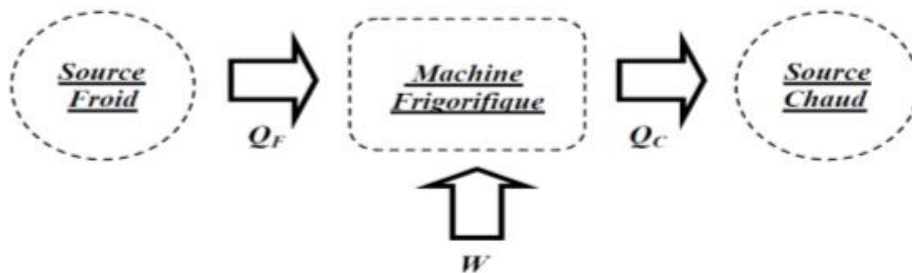
La figure II.1 montre le cycle de la production de froid.



**Figure II.1 :** principe de la production de froid

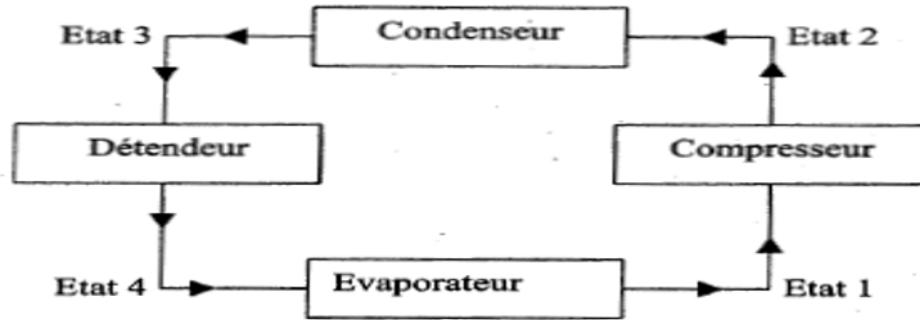
## II.5. La machine frigorifique :

Une machine frigorifique est un circuit fermé dans lequel circule un fluide frigorigène. Son fonctionnement est basé sur le principe thermodynamique utilisant les propriétés physiques d'un fluide pour assurer un transfert de chaleur ou d'énergie.



**Figure II. 2:** Diagramme énergétique d'une machine frigorifique.

Ce cycle frigorifique comprend quatre étapes : compression, condensation, détente, évaporation.



Figure

II.3 : cycle d'une machine frigorifique

## II.6. Classification des machines frigorifiques :

Les machines frigorifiques sont classées en trois grandes familles ; les machines à compression mécanique, les machines à compression étagée et les machines thermo frigorifiques.

### II.6.1. Les Machines à compression mécanique :

C'est les plus répandues. Elles sont simples et sont caractérisées par :

- Un fluide frigorigène se vaporisant à la température  $T_0$  et à la pression  $P_0$  en échangeant de la chaleur.
- Une compression et un refoulement à la pression  $P_k$ .
- Une condensation à la pression  $P_k$  dans un échangeur à la température  $T_k$ .
- Une détente avec changement de phase et échange de chaleur à la pression  $P_0$ .
- Le principe de la machine à compression simple est résumé dans la figure II.5

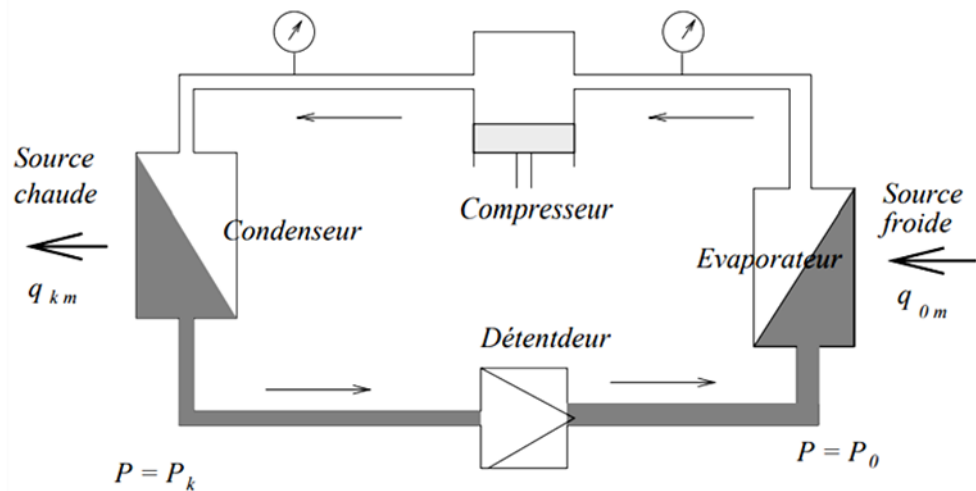


Figure II. 4 : principe de la machine à compression mécanique simple

### II.6.2. Les Machines à compression étagée :

La compression étagée, ou compression sur plusieurs étages, est utilisée si la différence entre la basse pression et la haute pression (BP, HP) est importante. En pratique, en cas de systèmes bi-étagés, l'installation contiendra deux compresseurs (BP  $\rightarrow$  MP et MP  $\rightarrow$  HP) avec refroidissement intermédiaire dans un ballon MP ou d'un seul compresseur avec admission à deux niveaux de pression (BP et MP) ; on parle dans ce dernier cas de système « superfeed ».

Parmi ces types de machine on cite :

- Système mono-étagée : Il regroupe
  - \* Systèmes mono-étagés à détente sèche applications domestique, commercial et la petite industrielle ou jusqu'à 50 kW frigorifique.
  - \* Système mono-étagés à recirculation : utilisés dans le froid industriel positif ou entre 100 kW jusqu'à 1 MW frigorifique.
  - \* Systèmes mono-étagés à frigoporteurs : utilisé en froid industriel positif, la grosse climatisation, entre 100 kW jusqu'à 1 MW frigorifique et ceux dont le ratio classique est de 1 à 2 kg de fluide par kW frigorifique.
- Systèmes bi-étagées : utilisés dans le froid industriel négatif ( $-40^{\circ}\text{C}$ ), les chambres froides, certains surgélateurs et entre 100 kW jusqu'à 1 MW. Il comprend :
  - \* Systèmes bi-étagés à injection partielle.
  - \* Systèmes bi-étagés à injection totale.

- \* Systèmes bi-étagés à distribution par pompe

### II.6.3. Machines thermo frigorigène :

Parmi ces machines :

- Machine frigorifique à absorption :

Dans les systèmes à absorption, le passage de l'évaporateur vers le condenseur est réalisé par l'association du fluide frigorigène à un autre fluide qualifié d'absorbant. Ce mélange va permettre au fluide frigorigène le passage d'un niveau de basse pression/basse température à un niveau de haute pression/haute température sous l'effet d'un apport de chaleur. Les caractéristiques de l'absorbant, en plus de son affinité envers le frigorigène, c'est d'absorber des vapeurs du frigorigène à basse pression et de s'en séparer par chauffage à haute pression.

Les autres composants du système sont, dans le principe, les mêmes qu'en compression. Ils sont représentés en Figure II.7

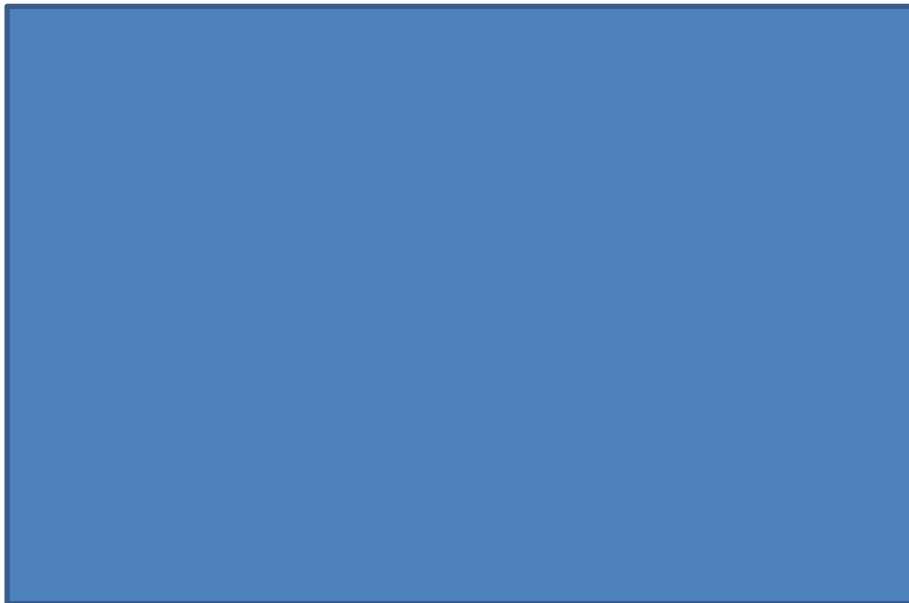


Figure II. 5 : Principe de la machine à absorption.

## II.7. Les fluides frigorigènes :

### II.7.1. Généralité :

Le fluide frigorigène est un fluide ou un mélange de fluides présentant des particularités physiques permettant d'exploiter un cycle de compression/détente pour échanger de la chaleur. Il possède une température d'évaporation faible sous pression atmosphérique qui

doit être inférieur à la température ambiante, le tableau II.1 donne les températures d'évaporation de certains fluides frigorigènes à la pression atmosphérique.

**Tableau II. 3** : Températures d'ébullition de quelques fluides à la pression atmosphérique.

<i>Fluide (réfrigérant)</i>	<i>Température d'ébullition (°C)</i>
Eau – H <sub>2</sub> O– R718	100
R-11	23,3
R-12	-29,8
R-22	-40,7
R-502	-45,6
Ammoniac – NH <sub>3</sub> – R717	-33,3

Les fluides frigorigènes sont utilisés pour refroidir des dispositifs réfrigérants (réfrigérateur, congélateur, climatiseur...).

La plus importante quantité de chaleur, absorbée ou rejetée à température et pression constantes, se passe durant le changement de phase.

### **II.7.2. Nomenclature des fluides frigorigènes :**

Les fluides frigorigènes sont soumis à une nomenclature internationale. L'ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, une des plus utilisées, désigne les fluides frigorigènes par la lettre R, réfrigérant, associée à 2, 3 ou 4 chiffres qui représentent le nombre d'atomes de chaque constituant ou de liaisons plus une lettre pour identifier les isomères de fluides. Les fluides frigorigènes sont aussi classés dans un groupe de sécurité suivant leur toxicité ou inflammabilité (la lettre majuscule correspond à la toxicité et le chiffre d'inflammabilité).

### **II.7.3. Classification :**

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

- Les composés inorganiques
- Les composés organiques

#### **II.7.3.1. Les composés inorganiques :**

Ces fluides sont ceux de la série 700. Le plus utilisé est l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) désigné par le code R717 où la lettre R désigne "Réfrigérant", le chiffre 7 des centaines désigne la série 700 et le chiffre 17 représente la masse molaire du corps, c'est à dire 17 g pour l'ammoniac.

Quelques exemples sont donnés au Tableau II.4 : **fluides frigorigènes inorganiques et**

**Tableau II.4** : fluides frigorigènes inorganiques et leurs codes

Codification	Masse Molaire (g)	Dénomination	Composition
R-717	17	Ammoniac	$\text{NH}_3$
R-718	18	Eau	$\text{H}_2\text{O}$
R-744	44	Dioxyde de carbone	$\text{CO}_2$

### II.7.3.2. Les composés organiques :

Les composés organiques sont des dérivés du méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ). Ils se divisent en trois sous familles :

- Les corps purs
- Les mélanges (de corps purs)
- Les hydrocarbures

#### Les corps purs :

Dans cette catégorie on distingue :

- Les CFC (chlorofluorocarbure), comme le R12
- Les HCFC (hydro chlorofluorocarbure) comme le R22
- Les HFC (hydrofluorocarbure) comme le R134a

Les molécules des CFC sont complètement halogénées, tandis que les HFC ne contiennent aucun atome de chlore. Quant aux molécules des HCFC, ils contiennent du chlore et sont non complètement halogénés, c'est-à-dire que certains atomes de chlore ont été remplacés par des atomes d'hydrogène.

#### Les hydrocarbures :

Ils proviennent du raffinage du pétrole et du dégazolinage (récupération des hydrocarbures liquides) du gaz naturel. Parmi eux le R600, butane, le R600a, isobutane, et le R290 qui est le propane et qui est le plus utilisé.

Ces fluides frigorigènes sont hautement inflammables.

**Les mélanges de corps purs :**

Ces fluides se regroupent en deux sous-groupes que sont :

- Les mélanges azéotropiques
- Les mélanges zéotropiques

Les mélanges zéotropiques sont les fluides frigorigènes de la série 400

Le tableau II.2 résume la classification des réfrigérants

Tableau II. 5 : Les principaux fluides frigorigènes et leurs codes.

Nature		Codification	Dénomination	Composition /% massiques
Composés inorganiques		R-717	Ammoniac	NH <sub>3</sub>
		R-718	Eau	H <sub>2</sub> O
		R-744	Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>
Composés organiques	Hydrocarbures	R-170	Ethane	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>
		R-290	propane	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
		R-600a	isobutane	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
	Hydrocarbures halogénés	Chlorofluorocarbures (CFC) et bromofluorocarbures (BFC)		
		R-11	Trichlorofluorométhane	CCl <sub>3</sub> F
		R-12	Dichlorodifluorométhane	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
	Hydro chloro fluoro carbures (HCFC)	R-22	Chlorodifluorométhane	CHClF <sub>2</sub>
		R-141b	1,1-dichloro-1-fluoroéthane	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F
		R-142b	1-chloro-1,1-difluoroéthane	CH <sub>3</sub> CClF <sub>2</sub>
	Hydro fluoro carbures	R-32	Difluorométhane	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
		R-125	Pentafluoroéthane	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>
		R-134a	1,1,1,2-tetrafluoroéthane	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
		R-143a	1,1,1-trifluoroéthane	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>
		R-152a	1,1-difluoroéthane	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>
	Les mélanges azéotropiques	R-502		R-22/R-112 (48,8/51,2)
		R-507		R-125/R-143a (50/50)
	Les mélanges zéotropiques	R-404A		R-125/R-143a/R-134a (44/52/4)
		R-407C		R-32/R-125/R-134a (23/25/52)
		R-410A		R-32/R-125 (50/50)

### II.7.3. Critère de choix d'un fluide :

Le choix d'un fluide frigorigène dépend de son utilisation et s'effectue en fonction de plusieurs critères qui sont :

- Sa sécurité d'usage.
- Son impact environnemental (ODP, Ozone Déplétion Potentiel) et PRG, (Pouvoir Réchauffant global).
- Ses qualités thermodynamiques.

Un fluide frigorigène parfait devrait présenter les qualités suivantes :

- 1°). Chaleur latente de vaporisation très élevée.
- 2°). Point d'ébullition, sous pression atmosphérique, suffisamment bas compte tenu des conditions de fonctionnement désirées (température d'évaporation).
- 3°). Faible rapport de compression, c'est-à-dire faible rapport entre les pressions de refoulement et d'aspiration.
- 4°). Faible volume massique de la vapeur saturée, rendant possible l'utilisation d'un compresseur et de tuyauteries de dimensions réduites.
- 5°). Température critique très élevée.
- 6°). Pas d'action sur le lubrifiant employé.
- 7°). Composition chimique stable dans les conditions de fonctionnement de la machine frigorifique.
- 8°). Pas d'action sur les métaux composant le circuit (ainsi, par exemple l'ammoniac attaque le cuivre). Pas d'action sur les joints.
- 9°). Non inflammable et non explosif en mélange avec l'air.
- 10°). Sans effet sur la santé du personnel.
- 11°). Sans action sur les denrées à conserver.
- 12°). Sans odeur ou n'ayant qu'une faible odeur non désagréable.
- 13°). Fuites faciles à détecter et à localiser par méthode visuelle.
- 14°). Pas d'affinité pour les constituants de l'atmosphère (couche d'ozone, réchauffement de la terre etc.)
- 15°). Être d'un coût peu élevé et d'un approvisionnement facile.

Le tableau II.3 présente quelques caractéristiques de quelques fluides frigorigènes

Aucun des fluides frigorigènes employés ne cumule l'ensemble de qualités. L'ammoniac est par exemple très irritant et corrosif en cas de fuite, mais n'a pas d'impact sur l'effet de serre et il est économique. Les hydrocarbures ont une puissance frigorifique élevée mais sont hautement inflammables. Le CO<sub>2</sub> possède un PRG 1.000 à 2.000 fois plus faible que les HFC mais il fonctionne à des températures très élevées, ce qui pose un problème de fiabilité de matériel.

**Tableau II.6** : Caractéristiques de quelques fluides frigorigènes.

Types fluides	Concentration max dans l'air (Kg/m <sup>3</sup> )	Sécurité	Température critique (°C)	Température d'ébullition à 1bar (°C)
R-134a	0,25	-	101	-26
R-407	0,31	-	87	-44
R-404A	0,48	-	73	-47
R-410A	0,44	-	72	-51
R-417A	0,15	-	90	-43
R-290(propane)	0,008	Inflammable	97	-42
R-717(NH <sub>3</sub> )	0,00035	toxique	133	-33
R-744 (CO <sub>2</sub> )	0,07	Haute pression	31	-57
R-718 (H <sub>2</sub> O)	-	-	374	100

### III.1. Introduction :

Le présent travail concerne la production du froid avec de l'ammoniac comme fluide frigorigène. Ce dernier est sans impact sur le réchauffement climatique ou la couche d'ozone en plus de ses avantages en matière de coût de production faible et des dimensions de l'installation pour la même puissance frigorifique,

Le système de réfrigération adopté est dit système indirect où l'eau est utilisée comme caloporteur pour véhiculer le froid. C'est un système où le froid n'est pas transmis directement aux utilisateurs mais par l'eau refroidie au niveau de l'évaporateur. Ainsi, le froid est produit dans un endroit, en salle des machines, pour être utilisé ailleurs.

Pour rendre accessible la notion de système indirect en réfrigération, une description du fonctionnement du cycle du froid est décrite en précisant l'évolution de l'état du fluide, le rôle de chaque composant du circuit et la position de chaque élément sur le diagramme Enthalpique

### III.2. Généralité sur l'ammoniac :

L'ammoniac est un composé chimique, de formule  $\text{NH}_3$ , sa structure moléculaire est représentée par une pyramide aplatie, au centre de laquelle se trouve l'atome d'azote. Les trois atomes d'hydrogène ainsi que le doublet non lié occupent les quatre sommets (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

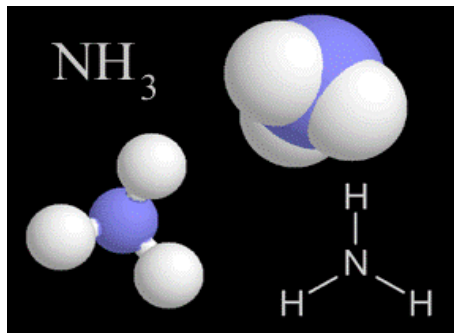


Figure III.1 : molécule de  $\text{NH}_3$

### Propriété physico-chimique :

Ses caractéristiques physiques essentielles sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau III.7 : principales caractéristiques physiques &amp; chimiques de l'ammoniac

Formule chimique	NH <sub>3</sub>
Masse moléculaire	17,03
Point d'ébullition	- 33,3 °C à la pression atmosphérique
Point de fusion	- 77,7 °C
Densité de vapeur relative	0,597
Tension de vapeur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 200 kPa à - 18,7 °C 500 kPa à 4,7 °C</li> <li>• 1018 kPa (10,05 atm) à 25 °C 2000 kPa à 50,1 °C</li> <li>• 4000 kPa à 78,9 °C</li> </ul>
LIE	16 %
LES	25 %
Chaleur latente de vaporisation	327,5 kcal/kg (1 371,24 kJ/kg)
Solubilité dans l'eau à 20 °C	33,1 % en poids
Température d'auto-inflammation	651 °C
Degré d'oxydation	-3
Acidité	Base de Lewis
Couleur	Incolore
Odeur	Piquante
Stabilité	Peu stable : $NH_3 \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2 + 46kJ$

### III.3. Réfrigération indirecte à l'ammoniac :

La réfrigération indirecte est la réfrigération qui requiert un fluide intermédiaire entre le fluide frigorigène et l'élément à refroidir.

#### Cheminement du frigorigène dans un système classique indirect.

L'ammoniac, gazeux aux conditions de température et de pression, est liquéfié par compression à bars dans un réservoir. Il est transporté par canalisation vers l'évaporateur à travers une soupape de régulation de débit. La soupape régule le débit en fonction de la demande en réfrigération.

L'ammoniac pénètre dans l'évaporateur détendu où il change d'état et redevient gazeux en absorbant de la chaleur qui correspond à la chaleur latente de vaporisation. La chaleur latente de l'ammoniac est si importante qu'elle fait de lui un réfrigérant efficace.

L'échange de chaleur à l'évaporateur est réalisé avec l'eau, fluide caloporteur acheminé vers les utilisateurs, zones à refroidir. Le fluide caloporteur conserve son état liquide sans changement de phase. Un tel système est dit système de réfrigération indirecte.

Après changement d'état dans l'évaporateur, l'ammoniac gazeux à une pression définit et est acheminé vers le compresseur qui amène la pression à un niveau initial, celui de son entrée au détendeur, avec augmentation de chaleur. Le gaz chaud à haute pression est ensuite refoulé vers un condenseur pour dissiper la chaleur et condenser le gaz. L'ammoniac liquide est alors emmagasiné dans le réservoir sous pression et le cycle peut recommencer (figure III.2).



**Figure III.2 :** Système de réfrigération à l'ammoniac

#### **III.4. Diagramme Enthalpique :**

Un cycle frigorifique fonctionne selon le diagramme Enthalpique, ou diagramme de Mollier. Le diagramme permet de suivre l'évolution de l'état du fluide frigorigène en fonction de la pression, de la température, de l'enthalpie, de l'entropie, du volume massique ainsi que de la composition du mélange liquide vapeur en tout point du système frigorifique.

La figure III.3 présente le diagramme Enthalpique du R717.

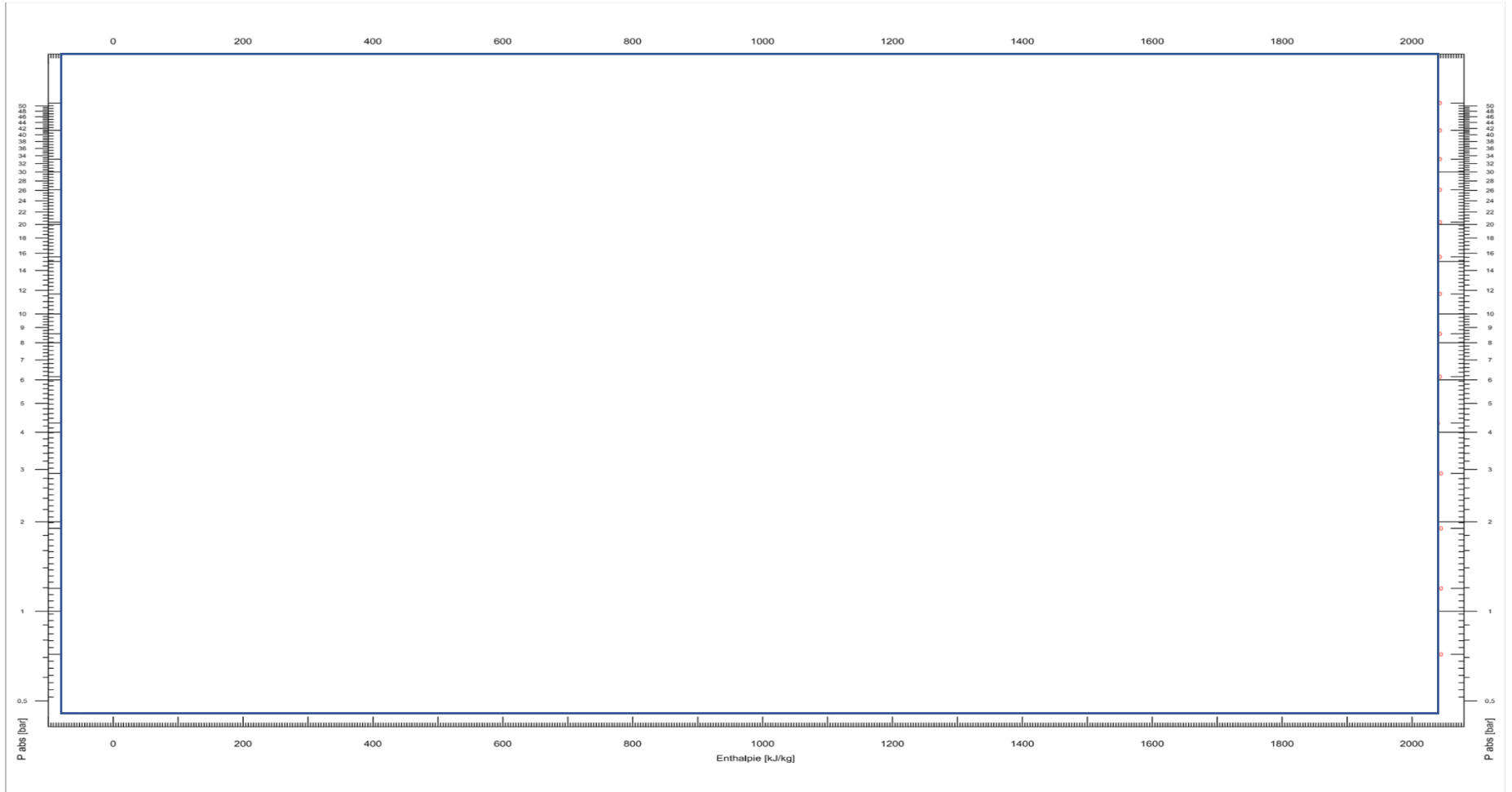


Figure III.3 : diagramme Enthalpique R-717

Le cycle frigorifique réalisé pour les besoins du présent travail est délimité sur le diagramme Enthalpique par 7 points (figure III.3) dont les coordonnées sont regroupées au tableau III.2

**Tableau III.8** : coordonnées des points du cycle frigorifique

Les points	Pression (bar)	Température (°C)	Enthalpie (KJ/Kg)
(1)			
(2)			
(3)			
(4)			
(2a)			
(2b)			
(4a)			

Le cycle frigorifique comprend 4 phases :

- **La Compression** : elle est isentropique et est située entre les points 1 et 2.
- **La Condensation** : C'est une transformation isobare avec changement de phase isotherme et 2 refroidissements. Elle se situe les points 2 et 3.
- **La Détente** : qui est une transformation isenthalpique avec refroidissement. Elle est située entre les points 3 et 4.
- **L'Évaporation** : transformation isobare avec récupération de la chaleur et augmentation de température. Elle est située entre les points 4 et 1

### III.5. Partie calculs :

La production du froid par de l'ammoniac, dans le cadre de ce travail, est réalisée pour refroidir du lait à la température de conservation de °C.

Le lait n'est pas refroidi directement mais par fluide intermédiaire qui est de l'eau. Ainsi, l'eau est refroidie dans l'évaporateur par de l'ammoniac, ensuite elle est dirigée vers un échangeur pour refroidir le lait.

Les objectifs de ce travail sont, donc

1. Détermination des paramètres de refroidissement, par fluide intermédiaire, du lait chaud, à °C, à la sortie de la pasteurisation, jusqu'à +4°C, température de stockage et de conservation.
2. Détermination des paramètres opératoires du fluide intermédiaire.
3. Détermination des paramètres opératoires du fluide frigorigène.

Pour la réalisation de ces objectifs, nous avons été contraints de dimensionner deux échangeurs pour le refroidissement flash du lait. Un échangeur entre le fluide frigorigène et le fluide caloporteur pour le refroidissement de l'eau, constituant ainsi l'échange indirecte ; c'est l'échangeur Ammoniac/Eau. Le deuxième échangeur est celui pour le lait ; c'est l'échangeur Eau/Lait.

### Échangeur thermique lait /eau :

Le lait, à la sortie de l'étape de la pasteurisation est porté à une température de °C. Il doit subir un refroidissement brusque jusqu'à 4°C pour finaliser la pasteurisation.

#### Quantité de chaleur cédée par le lait :

La chaleur cédée par le lait correspond à la chaleur sensible entre la température de °C et 4°C. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\Phi_{lait} = \dot{m}_{lait} \times C_{p\ lait} \times (T_{s\ lait} - T_{e\ lait})$$

Avec :

$C_{p\ lait} = 3,9 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$  : capacité calorifique du lait.

$T_{s\ lait}$  &  $T_{e\ lait}$  : respectivement température de sortie et d'entrée du lait dans l'échangeur

$T_{s\ lait} = 4^\circ\text{C}$

$T_{e\ lait} = \quad ^\circ\text{C}$

$\dot{m}_{lait}$  : débit massique du lait

L'unité fonctionne avec un débit volumique de lait :  $\dot{V}_{lait} = \quad \text{l/s}$

Pour une densité du lait de 1,05 kg/l, le débit massique  $\dot{m}_{lait}$  devient :

$$\dot{m}_{lait} = \quad \text{kg/s}$$

Ce débit attribue une quantité de chaleur à extraire du lait de :

$$\Phi_{lait} = \quad \text{kg/s} \cdot 3,9 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C} \cdot (4^\circ\text{C} - \quad ^\circ\text{C})$$

$$\Phi_{lait} = - \quad \text{kJ/s}$$

Cette chaleur est négative à cause du fait que le système perd de l'énergie.

#### Quantité de chaleur évacuée par l'eau :

Pour être refroidie à 4°C, l'eau doit extraire du lait une quantité de chaleur :

$$\Phi_{eau} = \quad \text{kJ/s}$$

Cet échange de chaleur est considéré total et sans déperdition d'énergie.

Calcul du débit d'eau :

La chaleur récupérée par l'eau est donnée par l'équation :

$$\Phi_{eau} = \dot{m}_{eau} \cdot Cp_{eau} \cdot (Ts_{eau} - Te_{eau})$$

Avec :

$Cp_{eau} = 4,18 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$  : capacité calorifique de l'eau.

$Ts_{eau}$  &  $Te_{eau}$  : respectivement température de sortie et d'entrée du lait dans l'échangeur

$$Ts_{eau} = \quad ^\circ\text{C}$$

$$Te_{eau} = \quad ^\circ\text{C}$$

$\dot{m}_{lait}$  : débit massique du lait

Le débit massique nécessaire à l'échange est

$$\dot{m}_{eau} = \frac{\Phi_{eau}}{Cp \times \Delta T}$$

$$\dot{m}_{eau} = \frac{\quad}{\quad \times (\quad - \quad)}$$

$$\dot{m}_{eau} = \quad \text{kg/s}$$

Calcul de surface d'échange échangeur lait/eau :

La surface d'échange est la caractéristique de l'échangeur lait/eau. Elle est calculée par l'équation 1 :

$$\Phi = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (1)$$

Avec

$$\Phi = \quad \text{kJ/s} = \quad \text{kW} : \text{chaleur échangée}$$

$$U = \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} : \text{coefficient d'échange global}$$

A : surface d'échange en  $\text{m}^2$

$\Delta T_{lm}$  : moyenne logarithmique des températures

L'expression de la surface d'échange thermique est :

$$A = \frac{\Phi}{U \cdot \Delta T_{lm}}$$

Le type d'échange considéré est à contre-courant (figure III.4). L'expression de la différence logarithmique de température est :

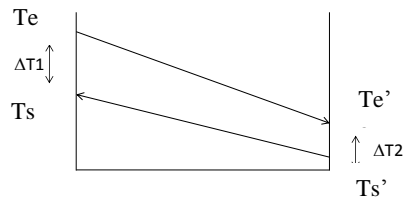


Figure III.4 : Profil de température d'échange à contre-courant

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

Avec :

$$\Delta T_1 = T_{e_{lait}} - T_{s'_{eau}}$$

$$\Delta T_2 = T_{s_{lait}} - T_{e'_{eau}}$$

$$\Delta T_{lm} = \quad \text{°C}$$

La surface d'échange devient :

$$A = \frac{kW}{W/m^2 \text{ °C} \cdot \text{°C}}$$

$$A = \quad m^2$$

L'échangeur que nous avons adopté est de type à plaques. Il a une forme  
et a l'avantage d'être pratique à l'utilisation. Ses dimensions sont :

Longueur :    cm.

Largeur :    cm.

Nombre de plaque :    plaques.

Nombre de plaque pour le lait :    plaques.

Nombre de plaque pour l'eau :    plaques.

Épaisseur entre les plaques :    mm .

Largeur totale de l'échangeur :    cm.

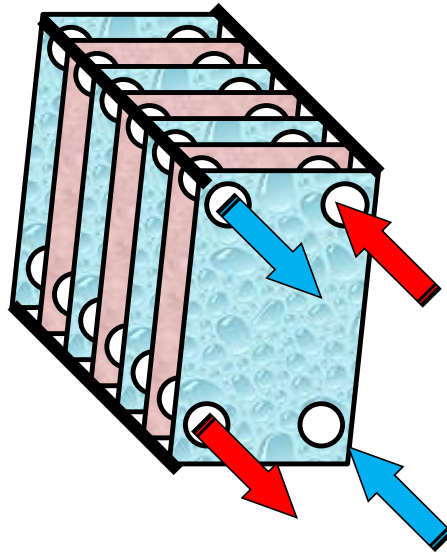


Figure III.5 : Echangeur à plaque.

### Échangeur thermique eau /Ammoniac

Cet échangeur est utilisé pour refroidir le fluide caloporteur par l'ammoniac, fluide réfrigérant.

Les paramètres calculés ne sont requis que pour le refroidissement du lait car dans la réalité le fluide caloporteur intermédiaire servira aussi à d'autres utilisateurs. Pour la simplification des calculs le circuit des autres utilisateurs a été volontairement omis.

Pour économiser de l'énergie et de l'eau, cet échangeur est relié avec l'échangeur lait/eau

comme le montre le schéma suivant :



Figure III.6 : schéma fonctionnel du circuit d'eau entre l'échangeur lait /eau et l'évaporateur.

Calcul du débit massique de l'ammoniac :

L'ammoniac à ce niveau est admis liquide et change de phase pour devenir gazeux selon le cheminement de la figure III.3 points 4 à 4a. L'énergie nécessaire au changement d'état est :

$$\Phi_{\text{NH}_3} = \dot{m}_{\text{NH}_3} \cdot L_v$$

Avec :

$$\Phi_{\text{NH}_3} = \quad \text{kJ/s} = \quad \text{kW} : \text{énergie totale de vaporisation}$$

$\dot{m}_{\text{NH}_3}$  : débit massique de l'ammoniac liquide

$$L_v = \quad \text{kJ/kg} : \text{chaleur latente de vaporisation de l'ammoniac à la pression considérée}$$

Le débit massique de l'ammoniac liquide devient :

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\Phi_{\text{NH}_3}}{L_v}$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\text{kJ/s}}{\text{kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \quad \text{kg/s}$$

Calcul de la surface d'échange échangeur Ammoniac/eau :

La surface d'échange de cet échangeur s'obtient :

$$\Phi_{\text{NH}_3} = U_{\text{NH}_3} \cdot A_{\text{NH}_3} \cdot \Delta\theta_{\text{NH}_3}$$

Avec

$$\Phi_{\text{NH}_3} = \quad \text{kJ/s} = \quad \text{kW} : \text{chaleur ou puissance échangée}$$

$$U_{\text{NH}_3} = \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} : \text{coefficient d'échange global}$$

$A_{\text{NH}_3}$  : surface d'échange en  $\text{m}^2$

$\Delta\theta_{\text{NH}_3}$  : différence moyenne de température

L'expression de la surface de l'échangeur pour un échange contre-courant est :

$$A_{\text{NH}_3} = \frac{\Phi_{\text{NH}_3}}{U_{\text{NH}_3} \cdot \Delta\theta_{\text{NH}_3}}$$

Pour un échange à contre-courant, l'expression de la différence moyenne de température est :

$$\Delta\theta_{\text{NH}_3} = T_c - \frac{T_{s\text{eau}} + T_{e\text{eau}}}{2}$$

Le fluide caloporteur est admis avec une température de  $\quad$   $^\circ\text{C}$  et quitte l'échangeur à  $\quad$   $^\circ\text{C}$ . La différence de température moyenne devient :

$$\Delta\theta_{\text{NH}_3} = T_c - \frac{T_{s\text{eau}} + T_{e\text{eau}}}{2}$$

$T_c =$  °C: température de condensation de l'ammoniac à la pression considérée.

$T_c$  est obtenue graphiquement.

$$\Delta\theta_{\text{NH}_3} = \text{°C} - \frac{+}{+}$$

$$\Delta\theta_{\text{NH}_3} = \text{°C}$$

La surface d'échange devient :

$$A_{\text{NH}_3} = \frac{(\quad) W}{W/m^2 \text{°C} \cdot \text{°C}}$$

$$A = \quad \text{m}^2$$

L'échangeur que nous avons adopté est de type à plaques. Il a une forme

. Ses dimensions sont :

Longueur : cm.

Largeur : cm.

Nombre de plaque : plaques.

Nombre de plaque pour l'eau : plaques.

Nombre de plaque pour l'ammoniac : plaques.

Épaisseur entre les plaques : mm.

Largeur totale de l'échangeur : cm.

### Condenseur de l'ammoniac.

Cet équipement est utilisé pour condenser les vapeurs d'ammoniac situées entre les points 2 et 3 de la figure III.3.

Le fonctionnement global du condenseur se déroule en 3 phases (figure III.3) :

- **Phase 1** : elle est située entre les points 2 et 2a.
- **Phase 2** : elle est positionnée entre les points 2a à 2b.
- **Phase 3** : située entre les points 2b et 3.

Détermination de la chaleur du fluide frigorigène évacuée au condenseur :

La chaleur évacuée correspond à la différence des enthalpies entre les points 2 et 3 (figure III.3).

$$\Phi_{\text{NH}_3 \text{ condenseur}} = \frac{\Phi_{\text{point 3}} - \Phi_{\text{point 2}}}{\dot{m}_{\text{NH}_3}}$$

Avec :

$$\Phi_{\text{point 3}} = \quad \text{kJ/kg}$$

$$\Phi_{\text{point 2}} = \quad \text{kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \quad \text{kg/s}$$

$$\Phi_{\text{NH}_3 \text{ condenseur}} = \frac{\text{kJ/kg} - \quad \text{kJ/kg}}{\text{kg/s}}$$

$$\Phi_{\text{NH}_3 \text{ condenseur}} = - \quad \text{kJ/s}$$

Cette valeur est négative parce que le système cède de la chaleur.

Calcul de la surface d'échange

Elle est établie par la relation :

$$\Phi_{\text{NH}_3} = U \cdot A \cdot \Delta\theta$$

Avec

$$\Phi_{\text{NH}_3} = \quad \text{kJ/s} = \quad \text{kW}$$

$$U = \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}: \text{coefficient d'échange global}$$

$$A : \text{surface d'échange en m}^2$$

$$\Delta\theta : \text{différence moyenne de température}$$

L'expression de la surface de l'échangeur pour un échange contre-courant est :

$$A = \frac{\Phi_{\text{NH}_3}}{U \cdot \Delta\theta}$$

Pour un échange à contre-courant, l'expression de la différence moyenne de température devient :

$$\Delta\theta = T_{c2} - \frac{T_s + T_e}{2}$$

$T_{c2} = \quad ^\circ\text{C}$ : température de condensation de l'ammoniac à la pression considérée.

$T_{c2}$  est obtenue graphiquement .

$T_s$  &  $T_e$  : respectivement température d'entrée et de sortie

$$T_e = \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_s = \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = \text{°C} - \frac{\quad}{\quad} +$$

$$\Delta\theta = \text{°C}$$

La surface d'échange devient :

$$A = \frac{\quad \times \quad W}{W/m^2 \text{°C} \cdot \text{°C}}$$

$$A = \quad m^2$$

### Calcul du débit d'air soufflé

flux thermique de  $\Phi = \quad$  kJ/s.

$C_p$  : chaleur calorifique de l'air

$C_p = \quad$  (kJ/kg °C)

Le débit d'air devient :

$$\dot{m} = \frac{\Phi}{C_p \cdot \Delta T}$$

$$\dot{m} =$$

$$\dot{m} = \quad \text{kg /s}$$

L'échangeur utilisé est un échangeur  $\quad$  dont les caractéristiques sont :

Longueur :  $\quad$  cm.

Largeur :  $\quad$  cm.

Nombre de plaque :  $\quad$  plaques.

Nombre de plaque pour l'eau :  $\quad$  plaques.

Nombre de plaque pour l'ammoniac :  $\quad$  plaques.

Épaisseur entre les plaques :  $\quad$  mm

Largeur totale de l'échangeur :  $\quad$  Cm.

## Conclusion générale

### Conclusion générale :

Le présent travail a été réalisé dans le cadre de la finalisation d'un cycle d'études de master en génie des procédés option génie chimique.

Il a consisté en l'étude et le dimensionnement d'un système de réfrigération indirect pour le refroidissement du lait avec, comme fluide frigorigène, l'ammoniac.

Le procédé indirect concerne les cas où le froid produit sert les utilisateurs par un intermédiaire qui, dans ce cas, est de l'eau.

L'ammoniac, comme fluide frigorigène, présente un certain nombre d'avantages comme son enthalpie de vaporisation et sa température critique très élevées ainsi que sa disponibilité et son prix bas par rapport aux autres fluides frigorigènes en plus de sa nature inoffensive pour l'environnement.

Les calculs réalisés ainsi que le dimensionnement ont concerné différents paramètres et ont abouti aux résultats suivants :

1. Type de production du froid : indirecte
2. Le fluide frigorigène : l'ammoniac.
3. Le fluide intermédiaire : l'eau.
4. Nombre d'échangeurs de chaleur : .
5. Type d'échangeurs
  - Echanger lait/eau.
  - Evaporateur : Echangeur ammoniac/eau.
  - .
6. Natures des échangeurs : à plaques
7. Caractéristiques de l'évaporateur
  - Forme : .
  - Dimension :
  - Nombre de plaques total : .
  - Fluide réfrigérant : Ammoniac.
  - Débit du fluide : g/s
  - Températures entrée/ sortie : °C et °C.
  - Fluide réfrigéré : eau.
  - Débit fluide réfrigéré : kg/s
  - Températures entrée/ sortie : °C et °C

## Conclusion générale

Néanmoins, ce travail dégage un certain nombre de perspectives :

1. Études .
2. Etude du rendement machine.

## Références bibliographiques

- 1- O. Perrot, "**Cours de machines frigorifiques**," 2010-2011
- 2- Saïd Bensaada et M .T . Bouziane, **Transfert de chaleur**, (novembre 2010), International Book Market Service Limited, 120 pages
- 3- Mounir bennajah ; Naoil Chaoui, **Echangeurs de chaleur technologie, calcul et design** (2014), Editions TECHNIP, 224 page
- 4- Frédéric LE BRONNEC, **Description des installations de réfrigération à l'ammoniac**, Atlantic Réfrigération Consulting (2010)
- 5- <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- 6- (<https://energieplus-lesite.be/donnees/froid-alimentaire4/proprietes-des-aliments/>)
- 7- <https://www.ingenieurs.com/documents/cours/machine-frigorifique-267.php>
- 8- <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/thermique-fluide-frigorigene-5754/>
- 9- Système de refroidissement fonctionnant à l'ammoniac, mesure de préventions  
P5 P 11 P 18
- 10- Mémoire de master – Université KasdiMerbah Ouargla « Modélisation d'une Machine Frigorifique À Compression mécanique de Vapeur » ;Khelif Abdel Gheffar ;2014
- 11- Mémoire de master – UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA« Simulation du cycle de la machine frigorifique NH3/CO2 à cascade l'aide du logiciel EES » DARAGLIA IMED EDDINE ; 2017
- 12- Docteur Fateh Mebarek Oudina , " **échangeur de chaleur** "

## Annexes

## Annexes A : Température et durée pratique de conservation.



Cuisine-Alimentaire.com

## Réfrigération : Température et durée pratique de conservation

## Produits non ou très peu sensibles au froid

Fruits					Produits animaux				
	°C	%HR	DPC		°C	%HR	DPC		
Abricot	0	90	2-4	s	Abats	-1,5 à 0	85-95	7	:
Cerise	0	90-95	1-2	s <	Agneau	-1,5 à 0	85-95	3-4	s
Citron (coloré)	0 à 4,5	85-90	2-6	m	Bacon (Wiltshire)	4	85-95	3-5	s
Datte (fraîche)	0	85	1-2	ni	Beurre	0 à 4		2-4	s
Fraise	0	90-95	1-5	j	Bœuf	-1,5 à 0	85-95	3-5	s
Framboise	0	90-95	1-4	i	Céphalopodes	-2 à 0		7-8	J
Kawi	-0,5	90-95	8-14	s	Crème	0		15	J
Noix de coco	0	80-90	1-2	m	Crustacés	0		4-6	i
Orange (s.o.v.)	0 à 4	85-90	3-4	m	Fromage (from)	5		1-2	s
Pêche	0	90	2-4	s	From. frais (se.)	0 à 2	85-90	2	m
Poire (s.o.v.)	0	90-95	2-5	m	From. ; à pâte molle (s.c.)	0 à 5	85-90	2	m
Pomme (s.o.v.)	0 à 4	90-95	2-5	m	From. dur (s.c.)	-1 à 1	70-75	12	m
Prairie	0	90-95	2-4	s	From. cheddar	0 à 5	80-85	3-6	m
Raisin (s.o.v.)	-1 à 0	90-95	1-4	m	Lait (cru)	0 à 4		2	J
					Lait (pasteurisé)	4 à 6		7	j
					Œufs en coquille	-1 à 0	90	6-7	m
					Poisson (s.c.)	0		6-14	J
					Porc	-1,5 à 0	85-95	3	S
					Saindoux	-1 à 0		4-8	m
					Veau	-1,5 à 0	85-95	3	S
					Viande hachée	4	85-95	1	J
					Volailles éviscérées	-1 à 0	85-95	1-2	s
					Volailles Non éviscérées	0	60-70	3	s
					Yoghourt	2 à 5		2-3	s

## Légumes

Ail	0	65-70	6-7	m
Artichaut	0	95	3-4	S
Asperge	0 à 2	95	2-3	S
Carotte sans feuille	0	95	5-6	m
Celeri	0	95	4-12	S
Champignon	0	90-95	5-7	j
Chou	0	95	1-3	m
Chou de Bruxelles	0	90-95	3-5	s
Chou-fleur	0	95	2-3	s
Épinard	0	95	1-2	s
Laitue	0	95	1-2	s
Mais doux	0	95	1	s
Navet	0	95	4-5	m
Oignon (sec)	0	65-70	6-8	m
Poireau	0	95	1-3	m
Pois (en cosse)	0	95	1-3	s
Pomme de terre (semence)	2 à 3	90-95	5-8	m
Radis	0	90-95	1-2	s
Rhubarbe	0	90-95	2-4	s

## Produits très sensibles au froid

Fruits	°C	%HR	D.P.C.
Ananas (vert)	10 à 13	85-90	2-4 s
Ananas (mûr)	7 à 8	90	2-4 s
Avocat	7 à 12	85-90	1-2 s
Banane (verte)	12 à 13	85-90	10-20 j
Banane (colorée)	13 à 16	85-90	5-10 j
Citron vert (s.o.v.)	10 à 14	85-90	1-4 m
Goyave	8 à 10	90	2-3 s
Lime	8,5 à 10	85-90	3-6 s
Mangue (s.o.v.)	7 à 12	90	3-7 s
Melon (s.o.v.)	7 à 10	85-90	1-12 s
Pamplemousse	10	85-90	2-3 m
Papaye	7-10	-	1-3 s

## Produits moyennement sensibles au froid

Fruits	°C	%HR	D.P.C.
Mandarine	4 à 6	85-90	4-6 s
Mangoustan	4 à 5,5	85-90	6-7 s
Pastèque	5 à 10	85-90	2-3 s
Légumes			
Haricot vert	7 à 8	92-95	1-2 s
Pomme de terre	4 à 6	90-95	4-8 m
P de T. (industrie)	7 à 10	90-95	2-5 m

## Légumes

Aubergines	7 à 10	90-95	10 j
Concombre (s.o.v.)	9 à 12	95	1-2 s
Comichon	13	90-95	5-8 i
Genévrier	13	65	6 m
Gombo	7,5 à 10	90-95	1-2 s
Igname	16	85-90	3-5 m
Patate douce	13 à 16	85-90	4-7 m
Poivron doux	7 à 10	90-95	1-3 s
Potiron	10 à 13	50-75	2-5 m
Tomate (verte)	12 à 13	85-90	1-2 s
(mûre)	8 à 10	85-90	1 s

## Fromages

Hollande	12 à 15	85
Emmenthal	10 à 12	80
Gruyère de Comté	10 à 12	80-85

## Légendes :

HR. = Humidité relative conservation  
s. c. = Suivant classe  
s. o. v. = Selon origine et variété  
J. = jour ; s = semaine ; m = mois ;

**Annexes****Annexe B : Chaleur spécifique des aliments.**

Produits	Chaleur spécifique (moyennes) au-dessus de 0°C (Wh/kgK)	Chaleur spécifique (moyennes) en-dessous de 0°C (Wh/kgK)	Chaleur latente de congélation (moyennes) (Wh/kg)
Viandes	0,87	0,47	64
Poissons	0,93	0,50	67
Fruits et légumes	1,04	0,53	80
Laitages	1,05	0,53	80
Fromage/beurre	0,76	0,41	47
Boissons	1,10	0,56	87
Pain/pâtisserie	0,52	0,52	37

**عنوان المذكرة:** التبريد باستخدام الأمونيا عن طريق تطبيق النظام غير المباشر للحفاظ على الحليب

**الملخص:** يعتمد هذا العمل على دراسة وتصميم آلة تبريد ضغط ميكانيكية تعمل مع الأمونيا كمبرد بطريقة إيكولوجية واقتصادية، مع أقصى قدر من كفاءة الطاقة لإنتاج البرد والتي سوف نخدمنا. لتبريد كمية محددة من الحليب بدرجة حرارة 85 درجة مئوية، في نهاية البسترة، حتى 4 درجات مئوية، درجة حرارة التخزين والحفظ باستخدام نظام غير مباشر، أي تتطلب سائل وسيط (ماء) بين المبرد والحليب، سيتم استخدام هذا المبرد نفسه فيما بعد للمعالجات الأخرى، وكل هذا في دورة مغلقة لإعادة استعماله.

وبالتالي سنحدد وحدات التبريد للمبرد والسوائل الوسيطة وحجم المبادلات الثلاثة المستخدمة في هذه العملية

**Report titre :** Refrigeration with Ammonia by Indirect System Application to the conservation of Milk.

**Abstract :**

This work is based on the study and design of a refrigeration machine with mechanical compression operating with ammonia as refrigerant in an ecological and economical manner, with maximum energy efficiency for the production of a positive cold which will serve us. for cooling a determined quantity of milk with a temperature of 85 ° C, at the end of pasteurization, up to + 4 ° C, storage and preservation temperature using an indirect system, i.e. requiring a intermediate fluid (water) between the refrigerant and the milk, this same refrigerant will be used later for other treatments, and all this in a closed cycle to reproduce as many times as necessary the refrigeration evolution of the whole system.

We will thus determine the cooling parameters of the refrigerant and the intermediate fluid and size the three exchangers used for this operation.

**Titre du mémoire :** Réfrigération à l'Ammoniac par Système Indirect Application à la conservation du Lait

**Master :** Génie des procédés chimique.

**Résumé :**

Le présent travail repose sur l'étude et la conception d'une machine frigorifique à compression mécanique fonctionnant à l'ammoniac comme fluide frigorigène de manière écologique et économique, avec une efficacité énergétique maximum pour la production d'un froid positif qui va nous servir pour le refroidissement d'une quantité déterminée de lait de température 85°C, à la sortie de la pasteurisation, jusqu'à +4°C, température de stockage et de conservation utilisant un système indirect c'est-à-dire requérir un fluide intermédiaire (l'eau) entre le fluide frigorigène et le lait ,ce même fluide frigoporteur va servir par la suite pour

d'autres traitements, et tout cela dans un cycle fermé pour reproduire autant de fois que nécessaire l'évolution frigorifique de l'ensemble du système.

Nous allons ainsi déterminer les paramètres de refroidissement du fluide frigorifique et le fluide intermédiaire et dimensionner les trois échangeurs servant pour cette opération.