République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique

Université Dr.Yahia Fares de Médéa

Faculté des sciences et de technologie

Projet de fin d'études

En vu de l'obtention du diplôme Master en Génie Climatique

Option : énergie et froid industriel.

Thème

Optimisation des paramètres d'une chambre froide pour produits alimentaires

Présenté par :

- Tedjani Soraya
- Taihi Radia

Dirigé par :

Dr . Abudura Salam

Promotion 2014/2015

Sommaire

Résumé

Figures et tableaux

Remerciement

Dédicaces

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralité

Introduction……04

1- Mode de production du froid et application……05

2- Quelque définition correspond au froid……..…06

2 -1 La chaleur…….06

2-1-1 La chaleur sensible……. …07

2-1-2 La chaleur latente ……....07

2-2 L'enthalpie ….. ……. 07

2-3La température……..……07

2-4 Procédé de production de froid…….08

* Mélange réfrigérant ……..……..08

*Détente d'un gaz comprimé…… …….……..08

2-5 Evaporation d'un liquide pur……..……...08

3-Les fluides frigorigènes …….……...09

*Rappel sur les gaz parfait……..09

*Critère de choix…… 10

4-cycle de Carnot……...11

5-Présentation du circuit frigorifique élémentaire……13

6-Définition des principaux organes de circuit frigorifique …….14

6-1 Compresseur …….14

6-2 Condenseur …….15

6-3 Détendeur ……16

6-4 Evaporateur …….16

Conclusion……...16

Chapitre 2 : chambre froide

Introduction ……19

1- Définition de chambre .froide…….……19
2- Objectif d'utilisation de chambre froide ……19
3- Les catégories de chambre froide ……20
4- Les types de chambre froide……...….22
   4-1 Chambre froide positive……..22
   4-2chambres froides négatives……23
5- Construction d'une chambre froide ……24
6- Le rôle de chambre froide ……..24
7- D'autre utilisation de la chambre froide…….24
8- Dégivrage et régulation……..26
   8-1 Généralité…… .…….26
   8-2 Conditions…….26
   8-3 Commande de dégivrage …….27
   8-4 Début……27
   8-5 Séquence …….27
   8-6 Arrêt ……28
   8-7 Différents modes de dégivrage des chambres froides positives…….28
   8-8Les dégivrages automatique …….29
9- Sécurités de fin de dégivrage …… ..29

Conclusion……30

Chapitre 3: Application de froid dans les produit alimentaires

Introduction…….……..31

Les produits laitiers

1-définition Produit laitiers…….31
1-1 La composition du lait……31
1-2Dérivés laitiers et leurs propriétés……...32
1-3 chaine de la production de lait et produit laitiers……..….33
1-4Application de froid dans l'industrie laitière……..34
2- Mode de refroidissement…….35
2-1 Refroidissement du lait cru……35
2-2 Refroidissement du lait vrac……..36
2-3 Refroidissement par ruissellement ……37
2-4 Les procédés de congélation……..38
Durée de congélation par un fluide cryogénique…….39
Durée de congélation en jours……..…40
2-5 Application de froid au cours de processus de fabrication…….40

Les viandes et poissons

3- composition des viandes et poissons ……41
4-apport nutritionnels caractérisant les viandes et poissons de groupe……41
5-La conservation de poissons et viandes……41
6-Règle d'application de froid……42
7-facteur d'altération……42
7-1 Teneur en eau de la viande et poisson……..42
7-2 L'humidité d'air…….42
7-3 Teneur en oxygène ……42
7-4 Teneur en d'entreposage…….43
7-5 Degré d'acidité ……..43
8- Réfrigération et congélation du poisson……43
9- Réfrigération et congélation de viande ……..45
10- Influence de microflore sur la viande et poisson réfrigérés……46

Légumes et fruits

11- Apport nutritionnels caractérisant les légumes et les fruits ……...46
12-composition de légumes……..47
13-composition de fruits……47
14-conservation de légumes et fruits…….47
15-condition de stockage……48
15-1 Température ……48
15-2 Humidité ……49
16- Les durées de conservation de légumes et fruits……49

conclusion ……50

Chapitre 4 : Modélisation des paramètres du R-134a dans une chambre froide.

1-Généralité ……51

1-1 L'impact environnemental ……...51

1-2 L'impact énergétique (ou qualité thermodynamique)……...51

1-3 Hypothèse de l'étude……52

1-4 Analyse……..53

2- Calcul propriétés thermodynamique de R_{-134a} ……54

2-1 Equation de l'état de vapeur saturante……54

2-2 Expression de grandeurs C_v V_p L_v h S ……..55

2-3 Pression de vapeur saturante ……55

3-Les résultats ……..60

*Variation de la température en fonction de la pression ……60

4-Régulation …….

4-1 La régulation thermostatique ……62

4-2 La régulation pressostat ……62

4-3 La régulation mixte ……62

4-4 Principe ……63

Conclusion ……63

Conclusion général

Bibliographique

L'annexe

ملخص

بعد إلقاء نظرة على التبريد بصفة عامة قمنا بأخذ لمحة على الأجهزة المكونة لغرف التبريد بالإضافة إلى دراسة حول مختلف غرف تبريد بأنواعها كما تطرقنا لتطبيقاتها في الحياة العامة من مواد غذائية لحوم لسمك مشتقات الحليب.

وكذا نتعرف في هذا العمل على سوائل المختارة و الملائمة لغرف التبريد وفي الأخير قمنا بتطبيق رياضياتي رقمي يحسب خصائص علم الحركة الحرارية لسوائل التبريد ألا و هو (R_{134a})

Résumé :

Après avoir passée à un refroidissement en général, nous avons pris un coup d'œil sur les dispositifs consistant l'étude sur les différents types de chambres froides comme nous avons parlé pour des applications dans la vie quotidienne de matériaux (La viande des aliments dérivés du lait de poisson …….)

Ainsi que de reconnaître dans ce travail sur les fluides sélectionnés et appropriée pour refroidir les Chambres et dans le quatrième, nous appliquons une science mathématique numérique calcule les Propriétés thermiques de la circulation des fluides frigorigènes et est le seul (R_{134a})

Abstract :

Having passed to a cooling in general, we took a look at the devices

Robust study on different types of cold rooms as we talked

For applications in everyday materials (meat of foods derived from milk fish .....)

And to recognize in this work on selected fluids and suitable for cooling

Rooms and in the fourth, we apply a digital calculates mathematical science

Thermal properties of the circulation of refrigerants and is the only (R134a).

Les figures :

Figure1-1 : schéma de circuit frigorifique

Figure 1-2 : compresseur

Figure 1-3 : condenseur

Figure 1-4 : détendeur

Figure 1-5 : évaporateur

Figure 2-1 : chambre froide gonflable

Figure 2-2 : schéma électrique d'une chambre froide.

Figure 2-3 : schéma d'un thermostat de régulation.

Figure 3-1 : l'appareil de refroidissement du lait en vrac

Figure 3-2 : schéma de refroidissement du lait en cru

Figure 3-3 : schéma d'appareil de refroidissement par ruissellement

Figure 4-1 : méthode de la sécante pour calculer le volume massique de la vapeur saturé.

Figure 4-2 : calcul de l'enthalpie au point 2 en fonction de l'enthalpie au point de référence.

Les tableaux :

Tab 2-1 : les températures de chambres froides alimentaires.

Tab 2-2 : utilisation de froid dans les processus laboratoires des différents produit laitiers

Tab 3-1 : les bactéries et les températures de croissances

Tab 3-2 : durées de conservation en fonction de la température

Tab 3-3 : durées de conservation de viandes pour différentes température de congélation

Tab 3-4 : durées de conservation de poissons pour différentes températures de congélation

Tab 3-5: durées de conservation de légumes.

Tab 3-6 : durées de conservation de fruits .

Tab 4-1 : les paramètres des fluides.

Tab 4-2 : coefficient de performance de chaque fluide.

Tab 4-3 : les caractéristiques entre deux points pour deux fluides frigorigènes.

Remerciement :

Mon premier remercîment va à Allah sobhanaho wa taala
Je tiens à remercier vivement Monsieur le professeur ABUDDURA SALEM de nous avoir proposé ce thème, encadré et conseillé tout au long de ce travail.
Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur le docteur BELHADJ ABDELMOUNIME pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.
Je souhaiterais à remercier mes professeur monsieur Zirari et monsieur Bachen et monsieur Hanini pour tout le savoir qu'ils nous ont donné.
Je ne saurais terminer cette énumération de remerciements sans n'y associer toute personne du département de Génie Mécanique, en particulier ou de l'université de Médéa En général à tout ami proche pour son encouragement.

Dédicaces

Avec un énorme plaisir un cœur ouvert et une joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifique parents qui m'ont soutenue tout au long de ma vie

Papa et Mama je vous aime

à mes frères, à ma sœur à toute la famille Taihi et en particulier, à ma binôme Tedjani Soraya, A mes chers amies Khadidja et Lamia , A mes chers cousines Ahlem, Selma, Louiza et Meriem

A toute personne qui m'ont encouragée ou aidée au long de mes études.

Radía

Dédicaces

Avec un énorme plaisir un cœur ouvert et une joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifique parents qui m'ont soutenue tout au long de ma vie

Papa et Mama je vous aime

ainsi à Mani Biha à mes frères Amine et Yassine, à mes sœur Asmaà et Djahida et son mari Nadjib à mon petit chouchou d'amour Ahmed Chahine à toute la famille TEDJANI et OULD TCHAKMAKDJI et en particulier à ma binôme Taihi Radia A mes chers amies Khadîdja et Lamia
A toute personne qui m'ont encouragée ou aidée au long de mes études.

Soraya

INTRODUCTION GENERALE :

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

On a pu estimer que dans certaines régions du monde, 50% des denrées alimentaires disponibles se perdent entre la période qui s'écoule entre le moment de la production et celui de la consommation. Ainsi, dans le domaine alimentaire, l'objectif du froid est de maintenir la qualité originale des produit en limitant (ou en supprimant) les altérations liées au développement des microorganismes, altérations très rapides dans les pays chauds à cause des conditions climatiques (température, humidité relative) qui sont favorables à la prolifération des bactéries, levures et moisissures. Pour les produits fabriqués par l'industrie agroalimentaire (lait, fromage…), le froid permet d'améliorer leur qualité en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une optimisation des paramètres climatiques influençant le comportement des microorganismes.

Le froid permet aussi l'augmentation du volume de production agricole par la modification du cycle végétatif des plantes améliorant ainsi leur rendement (printanisation des céréales…). En production animale, le froid permet la conservation longue durée des sérums et des vaccins destinés à enrayer les épidémies frappant les animaux. L'avancée technologique de nos jours qui autorise un contrôle plus précis de la température et de l'humidité permet d'améliorer la production du froid.

L'utilisation des atmosphères artificielles permet d'augmenter la durée de conservation de certains fruits et légumes, de même l'utilisation d'adjuvants permet de renforcer l'action du froid mais leur utilisation doit être conforme à la législation nationale relative à la protection des aliments. Dans les pays chauds et humides, une température de l'ordre de +10°C permet une bonne conservation du poisson fumé, du lait concentré ou en poudre, des conserves de viandes…ce qui montre une bonne complémentarité entre le froid et les autres techniques de conservations (séchage…).

Introduction générale

Il faut retenir que l'alimentation d'une population mondiale sans cesse croissante exige que des efforts réalisés pour accroître les productions alimentaires soient accompagnés d'initiatives destinées à réduire sinon à éliminer les pertes qui autrement resteraient considérables à toutes les étapes de la distribution et de la transformation des aliments. Dans le contexte des pays africains en voie de développement, ces initiatives de conservation des aliments doivent couvrir un vaste champ de techniques (abaissement de l'activité de l'eau, traitements thermiques à haute température, traitement thermique à basse température, abaissement du pH, utilisation d'additifs alimentaires, préparation stockage condition des aliments, séparation ou fractionnement).

Chapitre 1 : généralité

Introduction :

Le froid est l'absence de chaleur. Par comparaison, le froid est à la chaleur ce que l'obscurité est à la lumière.

La vie moderne impose le refroidissement des produits alimentaires en portant leurs températures au dessous d'une certaine température. Cette opération permet de les conserver plus longtemps. Le froid interdit aux bactéries et micro bactéries de se développer dans les aliments d'origine organique (viande, poisson…) ou végétale (fruits et légumes) ; tout au moins il en ralentit considérablement le développement.

Le froid ne stérilise pas les aliments mais les stabilise seulement dans le processus de détérioration qui reprendra des que la température s'élèvera. C'est approximativement entre 10 °c et 35 à 40°c que les activités microbiennes enzymatiques et les réactions d'oxydation atteignent leurs maximums. Leur ralentissement se suit entre 0 et -10°c les fruits quant à eux poursuivent leurs murissement même a basses températures.

Le froid possède des applications infinis dans touts les secteurs de l'activité humaine on peut citer :

-les industries alimentaires

-le confort de l'homme.

-La chimie.

-la médecine.

-La photographie.

- la métallurgie.

-la recherche scientifique.

1- MODES DE PRODUCTION DU FROID ET APPLICATIONS :

La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. De même, les applications du froid sont très variées. Parmi les différentes modes de production du froid, il faut retenir : la sublimation d'un solide (cas du CO2) la détente d'un gaz comprimé la fusion d'un corps solide le refroidissement thermoélectrique la dissolution de certains sels la désaimantation adiabatique la vaporisation d'un liquide en circuit fermé La sublimation d'un solide consiste à le faire passer de l'état solide à l'état vapeur par absorption de chaleur, le cas le plus courant est celui du CO2 qui à la pression atmosphérique a une température de sublimation de –78.9°C. La détente d'un gaz comprimé repose sur le principe de l'abaissement de la température d'un fluide lors de sa détente (avec ou sans travail extérieur). Cependant, cet abaissement est plus important lors de la détente sans travail extérieur (détente Joule -Thomson : étranglement à travers une vanne) mais il ne faut pas perdre de vue que le refroidissement du gaz détendu aura lieu seulement dans le cas où sa température avant la détente serait inférieure à la température d'inversion de l'effet Joule - Thomson. La fusion d'un corps solide se fait à température constante par absorption de la chaleur latente de fusion du corps considéré, ce procédé discontinu bien que simple présente l'inconvénient de nécessiter une congélation préalable à moins que cet état ne soit disponible à l'état naturel. 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 constitué de conducteurs de natures différentes reliés alternativement par des ponts de cuivre. La dissolution d'un sel dans l'eau provoque un abaissement de la température de la solution. Ce n'et pas un phénomène très utilisé dans l'industrie frigorifique à cause de la nécessité de vaporisation ultérieure de l'eau (récupération du sel). Par exemple, le mélange de neige et de potasse fait baisser la température de la solution de 0°C à 40°C. La désaimantation adiabatique consiste en une réorganisation du cortège électronique d'un corps, ce qui permet l'obtention de très basses températures.

La vaporisation d'un liquide permet de produire du froid par l'absorption de la chaleur à travers un échangeur (évaporateur), la vapeur produite étant ultérieurement liquéfiée dans un 10 autre échangeur (condenseur), le fluide décrit ainsi un cycle au

sein d'une machine fonctionnant de manière continue. Les machines utilisant ce principe peuvent être regroupées en deux grandes familles que sont les machines à compression mécanique et les machines à absorption. La vaporisation d'un liquide en circuit fermé reste la méthode la plus utilisée pour la production du froid. La production de froid pour les besoins domestiques, commerciaux et industriels nécessitent l'utilisation d'un dispositif capable d'extraire de la chaleur dans le milieu à refroidir pour la rejeter dans un milieu dit extérieur, ce dispositif qui obéit nécessairement au second principe de la thermodynamique est appelé « machine frigorifique ».

La conception, la réalisation et l'exploitation et/ou le suivi d'une telle machine nécessitent de bonnes connaissances en thermodynamique, en mécanique des fluides, en transfert thermique et en électrotechnique. Ces connaissances théoriques devront être complétées par une bonne familiarisation à la technologie des composants ainsi qu'à l'élaboration et à la lecture de schémas électriques ou de régulation. Dans le cadre de ce cours, il sera étudié les machines utilisant la vaporisation d'un fluide en circuit fermé. Le froid peut être produit directement ou indirectement.

On parle de refroidissement direct lorsque la substance à refroidir (par exemple l'air) est en contact avec le fluide circulant en circuit fermé dans la machine (par l'intermédiaire de l'échangeur). Le refroidissement est dit indirect lorsqu'on utilise un fluide intermédiaire (par exemple l'eau) entre la substance à refroidir (l'air) et le fluide circulant en circuit fermé dans la machine. Le fluide intermédiaire est appelé fluide frigoporteur. Le tableau ci-dessous fait un point des différentes applications du froid.

2- Quelques définitions correspondent au froid :

2-1 la chaleur :

La chaleur est une forme d'énergie au même titre que l'énergie mécanique ou électrique. La chaleur échangée par deux corps en contact est :

$$Q=mC(T\ finale-T\ initiale)\ pour\ chaque\ corps.$$

Q : en joule (j) ou en calorie (cal)

C : chaleur massique du corps en j/°K kg.

m : masse du corps en kg.

2-1-1 La chaleur sensible :

La chaleur sensible est la quantité de chaleur fournie ou perdue par un corps avec élévation ou abaissement de température. Il n'y a pas de modification de l'état physique du corps.

$Q=mC(T_{finale} - T_{initiale})$.

2-1-2 La chaleur latente :

La chaleur latente est la quantité de chaleur fournie ou perdue par un corps pur à pression et à température constante avec changement d'état physique.

$Q=m\,L$

Q : en joule (J) ou en calorie (cal).

L : en j/kg.

2-2 L'enthalpie :

L'enthalpie représente la capacité d'un système à donner (ou à prendre) de la chaleur. Elle constitue la chaleur potentielle contenue dans le système.

2-3 La température :

La température est l'impression subjective de la sensation de chaud ou de froid au toucher. Cette sensation est imprécise. Elle dépend :

-des individus.

-de la partie du corps en contact.

La température est le « niveau » auquel la chaleur se trouve dans un corps.

2-4 Procèdes de production de froid :

Il existe trois (3) procèdes de production de froid :

- Les mélanges réfrigérants.
- La détente d'un gaz comprimé.
- L'évaporation d'un liquide pur.

***mélange réfrigérant :**

La dissolution de certains sels nécessitant un apport de chaleur, cette dissolution produira donc du froid :

-eau + azotate d'ammonium +4,4°c à -15°c.

-neige+ chlorure de sodium 0°c à-25°c.

-neige+ acide chlorhydrique 0°c à -32°c

-neige +chlorure de calcium 0°c à-41,5°c

-glace carbonique + chlorure de méthyle, jusqu'à -82°c.

***détente d'un gaz comprimé :**

C'est sur ce principe que fonctionnent les machines permettant la liquéfaction des composants de l'air (azote, oxygène, néon, ….etc.)

***évaporation d'un liquide pur :**

Ce moyen reste le seul utilisé pour les besoins industriels et domestiques, en réfrigération, en congélation et en conditionnement d'air.
L'évaporation d'un liquide pur donne lieu à trois types de machine frigorifiques :

-machines à évaporation et compression d'un gaz liquéfiable.

-machines à absorption.

-machines à évaporation d'eau.

3- Les fluides frigorigènes :

Composés moléculaires utilisés pur ou en mélange, facilement liquéfiable et vaporisables. La vaporisation est endothermique, donc source de froid et la liquéfaction productrice de chaleur.

* Rappel sur les gaz parfait

a) Définition :

Le gaz parfait est tout d'abord un gaz c'est à dire un milieux fluide qui tend à occuper tout le volume du récipient qui le contient.
Le gaz est défini par son volume v, sa pression P et sa température thermodynamique T.

b) Loi des gaz parfait :

_ Lorsque la température est constante et que l'on fait varier la pression et le volume on dit que le gaz subit une transformation isotherme. Dans ce cas le gaz échange du travail W et de la chaleur Q avec le milieu extérieur. Le travail est le travail des forces de pression sur les parois du récipient, et la chaleur est la chaleur échangée à travers les parois.

$$W+Q= 0$$

_ Une autre transformation importante du gaz parfait est la transformation adiabatique qui n'échange pas de chaleur avec l'extérieur, mais la température peut alors varier. Si on suppose que la transformation est assez lente pour que, à chaque instant, le gaz reste en équilibre thermodynamique, on peut écrire une simple relation entre P, V, et une constante liée au gaz Y.

c) Equation de l'adiabatique réversible du gaz parfait:

La valeur de ϒ est égale au rapport entre la chaleur molaire à pression constante et la chaleur molaire à volume constant du gaz et dépend du nombre d'atomes contenus dans la molécule du gaz.

$$\Upsilon = \mathbf{Cp/Cv}$$

Exemple: Air ϒ =1,4

* Critère de choix :

a) Critères thermodynamiques :

Ces critères concernent principalement le constructeur de machines.

_ 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 se situer à une température de froid désirée, souvent négative.

_ La température de condensation doit être inférieure à la température critique pour que le changement d'état soit possible.

_ L'échauffement à la compression doit être réduit donc le coefficient aussi petit que possible.

_ Production frigorifique volumétrique spécifique: c'est la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur rapporté à l'unité de volume de vapeur aspiré au niveau du compresseur: elle doit être aussi grande que possible. Cette valeur est liée à la LV.

_ La condensation sera d'autant plus aisée que la chaleur massique de la vapeur saturante est faible.

b) Critères techniques des fluides frigorigènes :

_ Etre de faible activité chimique à l'égard des métaux, alliages et joints du circuit, ainsi que les lubrifiants qui leur sont mélangés et de l'eau (de 0,5 à 3% dans tous les fluides). La présence d'eau pourrait former des acides ou des bases qui sont corrosifs.

_ Avoir une bonne conductibilité thermique

c) Critères de sécurité :

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

_ Ininflammabilité et inexplosibilité en cas de mélange avec l'air.

_ Sécurité alimentaire: en cas de fuite, inactivité sur les denrées, non nocif pour le personnel, facilement détectable.

_ Non destructeur de la couche d'Ozone stratosphérique.

d) Critères économiques

_ Prix: regain d'intérêt pour l'ammoniac (NH3) en IAA (pas de réaction avec l'ozone)

_ Disponibilité: pour la recharge du circuit ou remplacement imposé par la législation.

* Classification :

_ **CFC** --> Chloro fluorocarbones **CxFyClz** *ex: CF2Cl2 («R12 »)*

_ **HCFC**--> hydrogénochlorofluorocarbones **CxHyClZFu** *ex: CHCLF2*

_ **HFC**--> Hydrogénofluorocarbures **CxHyFz**

_ **NH3**--> ammoniac

_ **NH3**: soumis à autorisation si la masse de mise en œuvre> 150 Kg, d'où l'intérêt d'installation à froid indirect (m>50 Kg).

_ **CFC:** utilisé mais fabrication interdite depuis 1995 .

_ **HCFC:** substituant de CFC dans les installations ; interdit en 2014.

_ **HFC:** pas de chlore, Seuls fluides autorisés à terme. Utilisés dans les installations neuves. Par contre on en peut rarement les substituer dans des installations au CFC.

Exemple de substitution :

R12 (CFC) par R134 a (HFC)

R114 (CFC) par R124 (HCFC)

R22 (HCFC) par R125 + R32 (HFC)

4-Le cycle de Carnot :

Le cycle de Carnot correspond à un processus cyclique réversible.

On considère un gaz parfait enfermé dans un cylindre obturé par un piston.

Les parois du cylindre sont isolantes son fond parfaitement

conducteur est placé à l'origine en contact avec une source de chaleur à la température Ta.

Les conditions initiales (**point A**) sont P_a, V_a, T_a.

On tire sur le piston le gaz se détend de V_a à V_b de manière isotherme.

La quantité de chaleur Q_{ab} équivalente au travail effectué passe de la source chaude vers le gaz.

La pression P_b se déduit de la relation :

$$\mathbf{P_b . V_B = n.R.T_a = P_a . V_a}$$

L'expression du travail est :

$$\mathbf{W = Q_{ab} = nRT_a.ln(\frac{V_b}{V_a})}$$

Au **point B**, le cylindre est isolé de la source et on continue à tirer le piston. Le volume du gaz croît de V_b à Vc de manière isentropique.

Le volume Vc se déduit de :

$$\mathbf{Ta.Va^{\gamma-1} = Tc.Vc^{\gamma-1}}.$$

La pression Pc se déduit de :

$$\mathbf{Pb.Vb^{\gamma} = Pc.Vb^{\gamma}}$$

La variation d'énergie interne est :

$$\mathbf{\Delta Ubc = n.c_v(Tc - Ta)}$$

et le travail est égal à

$$\mathbf{Wbc = - \Delta Ubc.}$$

Au **point C**, le cylindre est placé en contact avec une source à la température Tc et on repousse le piston : il se produit une compression isotherme au cours de laquelle la quantité de chaleur Q_{cd} passe du fluide à la source froide : le volume diminue de V_c à V_d.

L'expression du travail est :

$$\mathbf{Wcd = Q_{cd} = nRT_c.ln(\frac{v_c}{v_d})}.$$

Au **point D**, on continue à pousser le piston en isolant thermiquement le cylindre.

La compression isentropique ramène le système à son état initial A.

La variation d'énergie interne :

$$\mathbf{\Delta U.d_a = n.c_v(T_a - T_c)}$$

et le travail est égal à **:** $\mathbf{Wd_a = - \Delta Ud_a.}$

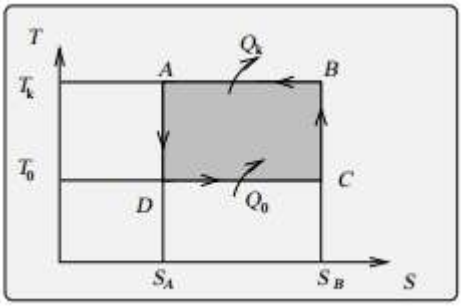
***Globalement** :

Energie interne : ΔU = ΔUbc + ΔUda = 0. (Processus cyclique réversible)

Travail : W = Wab + Wbc + Wcd + Wda = nR(Ta − Tb).ln(Vb / Va).

Rendement : η = W / Qab = 1 −Tc / Ta

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



1 er principe : W + Q0 + Qk = 0

2 e principe : Q0 = T0 (SC − SD)

Qk = Tk (SA − SB)

Ou SA = SD et SB = SC soit :

W = − (Q0 + Qk)

W = − [T0 (SC − SD) + Tk (SA − SB)]

= − (T0 (SB − SA) + Tk (SA − SB))

= − (SB − SA) (T0 − Tk)

Ou : SA < SB et T0 < Tk et donc : W > 0

Le système reçoit le travail W, prend la chaleur Q0 à la source froide et ce de la quantité de chaleur Qk à la source chaude.

5-Présentation du circuit frigorifique élémentaire :

Constitution :

Le circuit frigorifique élémentaire est constitué de :

-d’un compresseur.

-d’un condenseur.

-d’un détendeur.

-d’un évaporateur.

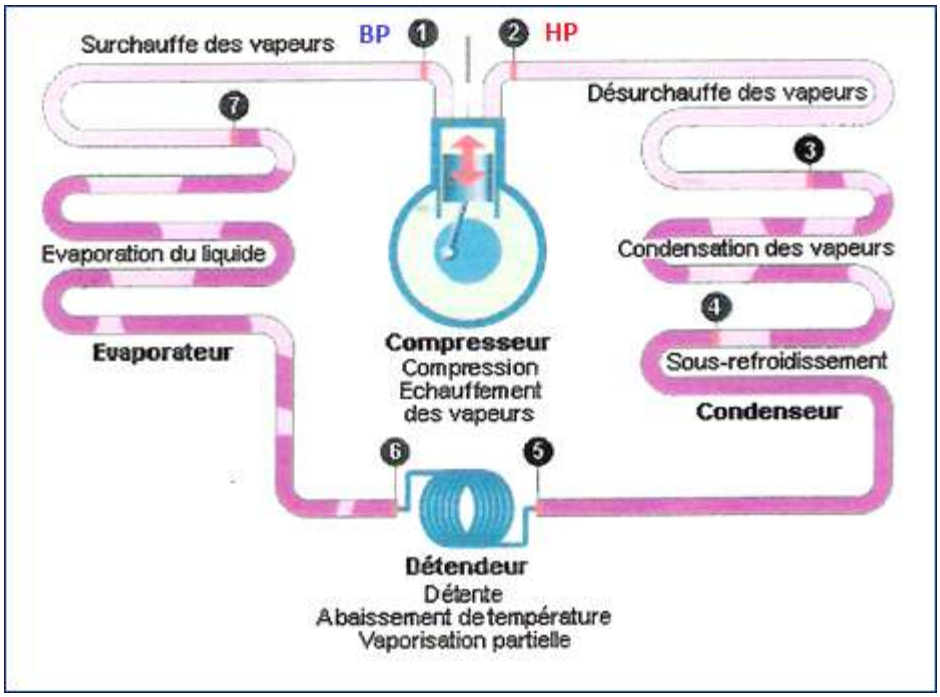


Figure1-1 : schéma de circuit frigorifique

6-Définition des quatre principaux organes du circuit frigorifique :

6-1-Compresseur :

Il aspire les vapeurs de fluide frigorigène à base pression et les comprime à haut pression. La compression est isentropique. Elle se fait en phase gazeuse.





Figure1-2 : compresseur

6-2- Condenseur :

C’est un échangeur de chaleur fonctionnant à haute pression. Il refroidit puis condense le fluide frigorigène. Il transmet la chaleur à un fluide de refroidissement (eau ou air) appelé médium.

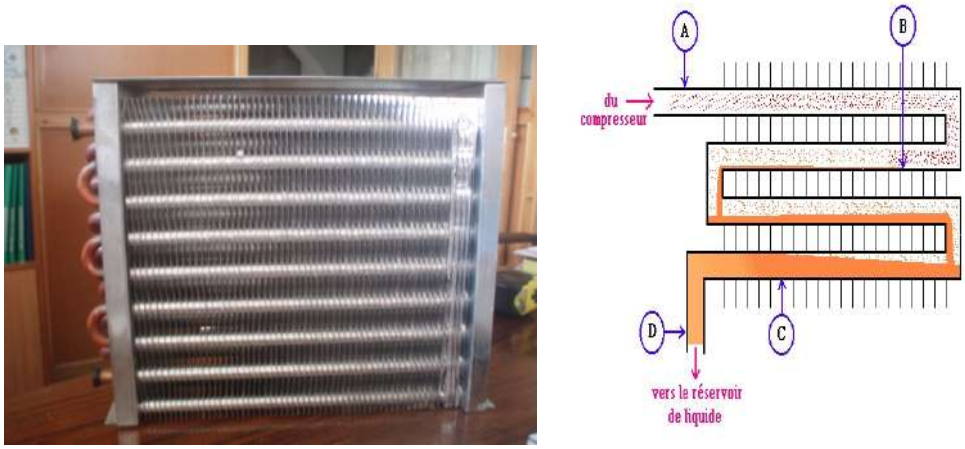


Figure 1-3 : condenseur

6-3-détendeur :

C’est un dispositif de détente de la haute pression en basse pression généralement par laminage, au travers duquel le fluide frigorigène s’écoule vers l’évaporateur.

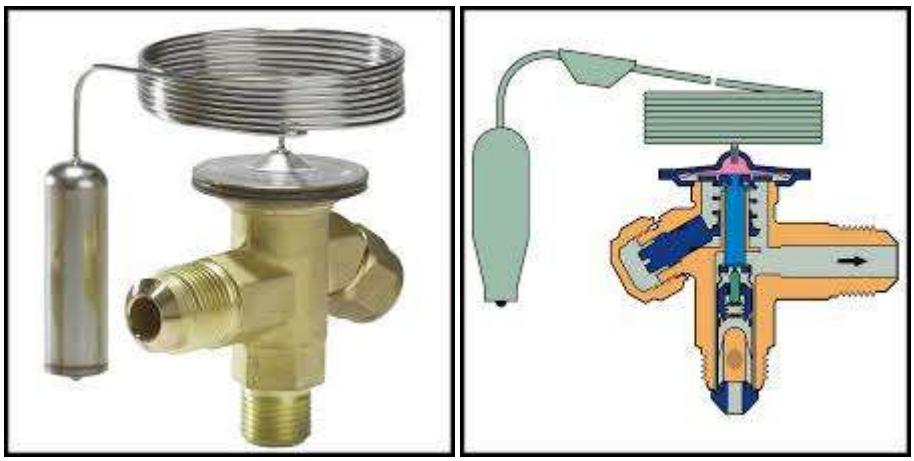


Figure 1-4 : détendeur

6-4-Evaporateur :

C’est un échangeur de chaleur fonctionnant à basse pression.

Il évapore le fluide frigorigène en absorbant la chaleur du milieu ambiant. L’évaporateur est placé dans l’enceinte à refroidir (le medium est alors de l’air) ou refroidi un liquide.

C’est à ce niveau qu’il y a production de froid.



Figure 1-5: évaporateur

Ces éléments ci-dessus cités sont reliés par une canalisation dans laquelle circule un fluide frigorigène qui subit des transformations thermodynamiques.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a vue les principes de la thermodynamique avec une généralité sur les connaissances du froid .

Chapitre 2 : les chambres froides

Introduction :

La chambre froide alimentaire est une pièce équipée d'une installation frigorifique. Si la température de la chambre froide soit inférieure à zéro (chambre froide négative) si non positive mais proche de zéro (chambre froide positive). Elles servent à abaisser la température dans un espace clos pour conserver des produits. Le froid permet en effet de stopper la croissance bactérienne et ralentit les réactions chimiques indésirables pour augmenter la durée de vie des produits agroalimentaires.

1-Définition de chambre froide :

C'est un local spécialement équipé pour la conservation, c'est adire le stockage des différents produits à basse température pour une longue durée.
Les produits qui on peut stocker dans les chambres froides sont en général l'agroalimentaire comme boucheries charcuteries, supermarchés, fromageries, les dates, les agrumes, la viande, mais on peut aussi stocker d'autre produit différent comme le boit par exemple en Espagne une technique utilisée pour traiter le bois 48 heurs en chambre froide hermétique avec un taux d'humidité contrôlé assure une extermination des larves, œufs, et les insectes xylophages dans les meubles et objets d'art.

2-Objectif d'utilisation de chambre froide :

Selon la définition du Petit Larousse c'est " un local spécialement équipé pour conserver les denrées périssables ‘‘.
Il est vrai que la majorité des chambres froides sont destinées à l'agro-alimentaire (supermarchés, boucheries charcuteries, fromageries...) mais il y a d'autres professionnels et particuliers, si on considère les chasseurs, qui se servent des chambres froides.
La chambre froide est une pièce équipée d'une installation frigorifique qui sert à conserver des végétaux (pour les fleuristes, par exemple), des produits secs, frais et surgelés.
On se sert également des chambres froides pour tester le vieillissement d'un produit pour chambres frigorifiques : le froid permet de stopper la croissance bactérienne et ralentit les réactions chimiques indésirables des produits.

Évite aux nourritures de s'abîmer car chaque produit à une température bien déterminé pour le stocker dans les conditions normales voir ce tableau pour bien comprendre.

Réguler L'humidité parce qu'à un rôle très important dans le facteur de poids de quelques produits comme la viande.

Chambre froide poisson	2 à 4 °C
Chambre froide viande	2 à 4 °C
Chambre froide fruits et légumes	4 à 6 °C
Chambre froide pâtisserie	2 à 4 °C
Chambre froide de jour	2 à 4 °C
Congélateur	- 20 à - 30 °C
Cave à vin conditionnée	10 à 12 °C/HR 75 %
Local de tranchage	10 °C
Local de stockage des déchets	10 °C

3-Les catégories de chambres froides :

On distingue trois catégories de chambre froide

- **Les chambres froides traditionnelles :**

Le local de ce type est fabriqué en maçonnerie, mais avec double mur de chaque cote pour bien abaisser le transfert thermique et pour protéger cette isolation, il faut placer un écran par vapeur.

- **Les chambres froides préfabriquées indémontables :**

Les parois de ce type de chambre froide sont fabriquées en usine et le montage définitif se fait sur chantier à laide de cadres métalliques et un système spécial de fixation.

- **Les chambres froides préfabriquées démontables :**

Ce type de chambre froide est composé de panneaux sandwich peuvent être rassemblés et démontés plusieurs fois. Et la fixation se fait par une clé qui serre les panneaux entre elles finie par un joint isolant l'avantage de ce type la possibilité de déplacer la chambre froide en autre place facilement.

- **Les Chambres Froides mobile gonflable :**

Une nouveauté dans le domaine de la conservation de produits frais.
Celle-ci ce monte en 10 minutes et atteint une température intérieure de 3°C en 45 minutes seulement.
Vous pouvez monter et démonter cette chambre froide autant de fois que vous le désirez.
Elle apporte des solutions pratiques et professionnelles aux nécessités de conservation et de stockage pour hôtels, restaurants, entreprises de cat ring, commerces et cuisines industrie.





Figure 2-1: chambre froide gonflable.

4-Les types de chambre froide :

On trouve deux types classés selon la température :

4-1- La chambre froide positive :

Lorsque on veut stocker des denrées alimentaires, laquelle la température de conservation est inférieure à dix degrés Celsius 10, on utilise une chambre froide positive.

***La catégorie des chambres froides positives :**

Dans les chambres froides à froid positif, il règne une température située au dessus de 0°C. Bien que la température de référence pour ce type de chambre froide soit de 3°C, elle peut néanmoins varier en fonction de la nature des aliments qui y sont stockés. À noter qu'on y observe généralement une température d'évaporation de -5°C. Ce type de chambre froide est particulièrement adapté aux fruits et aux légumes de quatrième gamme, c'est à dire des aliments prêts à l'emploi nécessitant une réfrigération (et non une congélation) : une douceur fraîche (entre 0 et 4°C) et une forte humidité (entre 85 et 95%) sont conseillées si on souhaite conserver toutes les qualités gustatives et

nutritionnelles de ces aliments (frais, croquants, riches en vitamine). C'est le réfrigérant R134A qui est généralement constaté dans ce type de chambre froide.

4-2-La Chambre froide négative :

Et lorsque on veut stocker des produits dont la température de conservation est supérieure à dix-huit degré Celsius on utilise une chambre négative.

***La catégorie des chambres froides négatives :**

À l'instar des congélateurs domestiques, les chambres froides à froid négatif présente une température inférieure à 0°C. Elle est statuée à -18°C mais la chambre froide peut être configurée pour des températures encore plus froides. La température d'évaporation généralement observée n'y dépasse pas les -30°C. Le froid négatif entraîne la solidification de l'eau contenue dans les aliments et la formation de cristaux de glace ne détériorant pas les cellules de l'aliment. Ce type de chambre froide convient donc idéalement aux aliments nécessitant une congélation pour une plus longue durée de conservation. À -18°C, on observe une conservation d'au moins un an pour la plupart des fruits, légumes, viandes et volailles, et d'au moins six mois pour la plupart des produits de la mer et les produits laitiers. Dans ces chambres froides à froid négatif, on y trouve généralement le réfrigérant R404A.

5-La construction d'une Chambre froide :

***** Le compresseur frigorifique aspire le fluide réfrigérant dans l'évaporateur. Le détendeur (minuscule trou calibré) freine l'introduction du liquide dans l'évaporateur. Comme la pompe aspire beaucoup, elle a tendance à faire le vide dans l'évaporateur. De ce fait, la pression intérieure est très faible. On oblige ainsi le liquide à s'évaporer.
Or le liquide a besoin de beaucoup de chaleur pour s'évaporer et se transformer en "gaz". Il va prendre cette chaleur dans les tuyaux et les ailettes de l'évaporateur ce qui va les refroidir intensément.

***** Dans la chambre froide, un ventilateur brasse l'air intérieur à travers l'évaporateur. Cet air est refroidit au contact des tubes et des ailettes de l'évaporateur. L'air perd sa chaleur. Cette chaleur sert à évaporer le liquide qui se trouve à l'intérieur de l'évaporateur.

***** La chaleur intérieure de la chambre froide part de cette façon dans les tuyaux sous
ne de vapeur (appelé gaz) vers le compresseur. Ce compresseur, placé à l'extérieur de la
mbre froide, aspire ce gaz et le comprime fortement.

***** Sous l'effet de cette compression, le gaz passe de -20°C côté aspiration du compresseur à + 50°C côté refoulement du compresseur. On oblige ensuite le gaz devenu chaud à se condenser en le refroidissant grâce au condenseur placé à l'extérieur de la chambre (le condenseur est ce radiateur avec des tubes, des ailettes et un gros ventilateur).

***** En passant de l'état vapeur à l'état liquide à l'intérieur des tuyaux du condenseur, le gaz va rejeter la chaleur qu'il a pris à l'intérieur de la chambre froide. Cette chaleur est évacuée par le ventilateur du condenseur qui réchauffe l'air extérieur.
Cette chaleur rejetée à l'extérieur est la même que celle extraite à l'intérieur de la chambre froide.

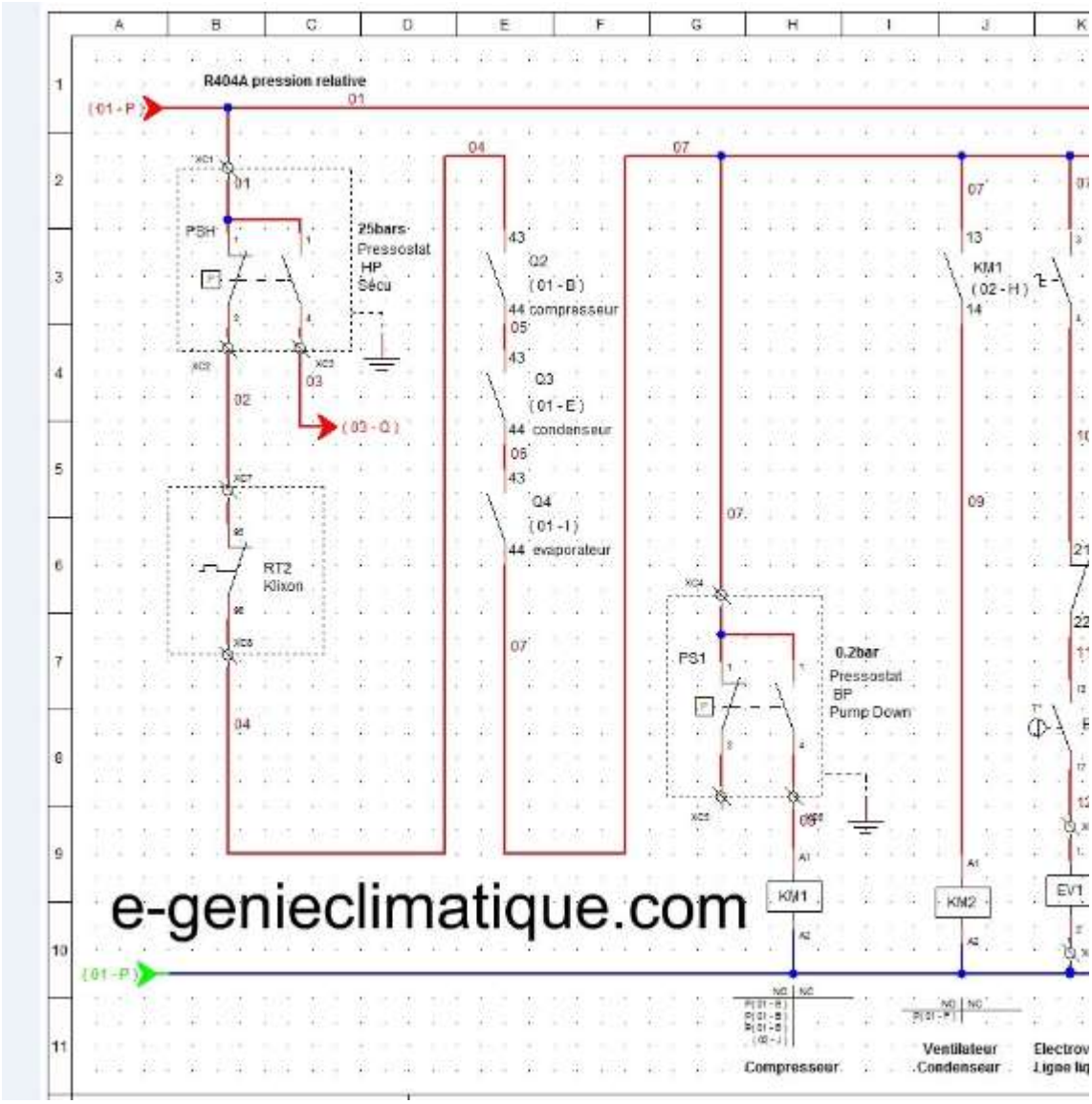


Figure 2-2 : schéma électrique d'une chambre froide.

6-Le rôle d'une chambre froide :

Indispensable pour stocker et conserver des denrées périssables en grande quantité et à basse température, la chambre froide est une étape primordiale puisqu'elle constitue le dernier maillon de la chaîne du froid avant l'achat du produit par le consommateur. Contrairement à une idée reçue, la chambre froide n'a pas pour mission de refroidir les denrées mais d'en maintenir la température, puisqu'en général, la congélation a déjà eu lieu au moment de la production. La chambre froide joue donc d'abord un rôle de transport (camion frigorifique) puis de stockage et d'exposition afin de maintenir les meilleures conditions de conservation (avec par exemple le meuble frigorifique d'un

magasin). Par ailleurs, on distingue deux catégories de chambre froide : celle à "froid positif" et celle à "froid négatif".

7-D’autres utilisations de la chambre froide :

Bien qu'elle serve généralement à stocker des aliments, la chambre froide peut également avoir d'autres utilisations. Elle peut par exemple faciliter l'entretien des objets d'art : il s'agit d'une méthode de traitement mise en place en Espagne. En effet, un séjour de 48 heures en chambre froide assure une totale extermination des insectes xylophages (ceux là même qui se nourrissent de bois). Cette méthode se veut écologique car aucun produit chimique ou toxique n'est utilisé. Ainsi les objets traités (meubles, objets d'art, livres) voient leur durée de vie considérablement allongée. La chambre froide se révèle enfin indispensable au pharmacien hospitalier : ce dernier doit veiller au respect de la chaîne de froid dès lors qu'il s'agit de détenir et de stocker des médicaments réfrigérés (notamment pour des essais cliniques) dans des conditions de conservation parfaitement idéales.

8- le dégivrage et la régulation :

8-1Généralité :

Lorsque, dans les évaporateurs refroidisseurs d'air, la température de la batterie est inférieure à 0°C, du givre se dépose sur les tubes.

Le givre réduit l'intensité des échanges thermiques et le brassage de l'air. Aussi, est-il nécessaire de procéder régulièrement au dégivrage de la batterie (évaporateur, gaine, égouttoir...).

Les problèmes essentiels du dégivrage sont:

- le choix du mode de chauffage
- la réduction des pertes de chaleur
- la détermination de la fréquence.

8-2 Conditions:

Une opération de dégivrage se décompose en trois périodes:

- période de réchauffement durant laquelle la batterie et le givre sont réchauffés à une température égale à 0°C.

- Période de fusion durant laquelle, en plus de la chaleur nécessaire à l'élimination du givre, il faut tenir compte de la chaleur nécessaire au séchage de la batterie.
- Période de refroidissement durant laquelle la batterie dégivrée est refroidie jusqu'à la température de consigne du local.

En général, on considère que la durée du dégivrage ne correspond qu'aux deux premières périodes. Il est plus exact de définir la durée du dégivrage comme le temps compris entre le début du processus de dégivrage et le premier arrêt automatique du système frigorifique.

La quantité de chaleur mise en jeu par la fusion du givre est une fraction du bilan global d'une opération de dégivrage. L'efficacité du dégivrage, peut-être exprimée par le rapport de ces deux quantités de chaleur.

Il est d'autant plus élevée que:

- la masse de givre à évacuer est importante,
- la durée du dégivrage est brève,
- les pertes sont petites.

8-3Commande du dégivrage:

La commande automatique des opérations de dégivrage d'un évaporateur comprend trois dispositifs; le premier provoque le dégivrage, le deuxième détermine la séquence du dégivrage, le troisième commande la fin du dégivrage.

8-4Début:

Une opération de dégivrage peut-être provoquée soit quand s'est formée une certaine épaisseur de givre, soit à intervalles de temps réguliers et prédéterminés.

Dans le premier cas l'épaisseur de givre peut-être appréciée par un détecteur d'épaisseur.

Dans le deuxième cas les opérations de dégivrage sont déclenchées au moyen d'une horloge (plusieurs fois par jour). Celle-ci arrête la production de froid et déclenche la séquence de dégivrage.

8-5 Séquence:

Un système automatique des opérations de dégivrage comporte, selon le mode de chauffage adopté, tout ou partie des opérations suivantes:

- vidage de l'évaporateur; arrêt, si nécessaire, du compresseur; arrêt des ventilateurs,
- mise en service du dispositif de chauffage de la batterie et de l'égouttoir,
- mise-en froid de la batterie pour la prise en glace des gouttelettes d'eau.

8-6 Arrêt:

La fin du dégivrage peut-être commandée:

- Par un thermostat d'élément (fin de dégivrage) qui détermine l'élévation de la température de la batterie à une valeur supérieure à 0°C.
- Par un pressostat basse-pression qui déclenche quand la pression devient suffisamment élevée.
- Par l'horloge; dans ce cas la durée du dégivrage est prédéterminée. Ce dispositif présent l'inconvénient d'être aléatoire si la durée est excessive, la dépense énergétique est inutilement accrue, si la durée est trop courte l'évaporateur est mal dégivré.

Aussi, est-il indispensable, quel que soit le système de commande adopté, de surveiller attentivement et régulièrement les conditions pratiques dans lesquelles s'opèrent le dégivrage des évaporateurs.

8-7 Différents modes de dégivrage des chambres froides positives:

Lorsque la température d'évaporation descend en dessous de zéro degré, du givre se forme sur l'évaporateur. Le dégivrage est assuré à l'arrêt du groupe, par la ventilation forcée de l'évaporateur dans un milieu ambiant à température positive.

A chaque cycle:

Dans ce cas la régulation (thermostatique ou pressostatique) commande le groupe. La ventilation de l'évaporateur fonctionne en marche forcée.

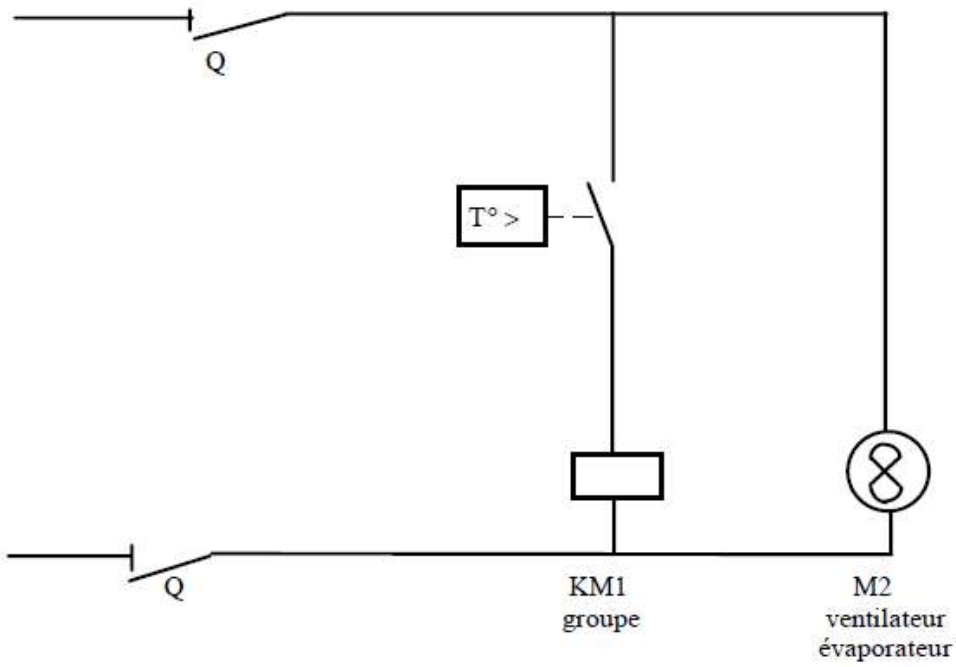


Figure 2-3 : schéma d'un thermostat de régulation.

Cette ventilation permanente dessèche les produits non emballés entreposés.

8-8 Les dégivrages automatiques:

Ils seront tous commandés par pendule (interrupteur horaire)

***Pendule de dégivrage:**

Alimentée en monophasé 220V puis mise à l'heure, elle doit être programmée pour plusieurs (quatre en général) dégivrages journalier aux heures creuses d'utilisation de la chambre froide.

Son rôle est de déclencher à heures fixes sur le circuit de commande:

- l'arrêt de la congélation
- et l'alimentation du circuit de dégivrage

En fin de séquence (après dégivrage complet de l'évaporateur) la pendule commande la remise en congélation.

***Dégivrage par résistances chauffantes électriques:**

Des résistances en forme d'épingle traversent de part en part l'évaporateur parallèlement aux tubes. Le givre et la glace se détachent et finissent de fondre dans l'égouttoir également chauffé par résistances. Une canalisation maintenue hors gel jusqu'à l'extérieur de la chambre par un cordon chauffant évacue l'eau de dégivrage.

9-Sécurités de fin de dégivrage:

La fin du dégivrage est assurée par:

- L'horloge.
- L'horloge et un thermostat de contrôle de fin de dégivrage.

Dans tous les cas un thermostat de sécurité dont le bulbe est voisin du thermostat de fin de dégivrage peut être utilisé. Monté en série avec le relais de dégivrage son contact s'ouvre à +24°C et se referme à +4°C.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a vue le concept de la production du froid avec une explication de différents types de chambre froide et leur mode de fonctionnement , et on a fait une démontration du dégivrage .

Chapitre 3 : application du froid dans les produits alimentaires

Introduction :

L'utilisation du froid pour la conservation des aliments périssables est sans conteste la technique la plus répandue. Les basses températures permettent de conserver un produit pendant un temps plus ou moins long et pouvant être consommé avec sécurité tout en gardant son aspect, sa couleur, ses qualités gustatives, nutritives et hygiéniques. Le froid retarde le développement des microorganismes, la majorité des germes ne sont plus capables d'activité métabolique à des températures inférieures à 5°C tel que les coliformes
Il est le procédé presque parfait de la conservation des produits alimentaires, et le meilleur connu actuellement.

Produit laitiers

1-Définition de produit laitiers :

Les produits laitiers font d'alimentation depuis des millénaires. Ils occupent une place importante au sien d'une alimentation saine et équilibré non seulement à cause de leur grande valeur nutritive, mais également à cause du plaisir que preuve leur consommation que se soit seul on intègre des recettes, leur diversité est sans égal. De plus, le dynamisme de industrie laitier fait en sorte que le nouveaux produit voient constamment le jour, offrons ainsi une gamme de produit nutritifs et délicieux de plus en plus vaste aux tout petits comme aux grandes les principaux sont :

- Fromage,
- Lait,
- Beurre,
- Yaourt .

1-1- La composition de lait :

Lait est un élément liquide complot très nourrissant bénissant à lui seul les composants nécessaire à l'alimentation humaine dans 100 Kg de lait. Il ya 37 Kg d'eau et 13 de matières sèches.

Les principaux constituants solides du lait sont la matière grasse, les protéines et le lactose leur concentration varie selon les races animales productrices de leur alimentation et de l'environnement.

1-2- Dérivés laitiers et leurs propriétés :

Ce sont les denrées suivantes destinées à la consommation humaine.

- **Produits composés de lait :**

Produits dont aucun ne se substitue ou ne tend à se substituer à un constituant quelconque du lait et dont le lait ou un produit laitier est une partie essentielle (au moins 50%) soit par sa qualité, soit par son effet, Caractéristique ces produits sont :

- Le lait de consommation : lait destiné a été livré à la consommation
- Le crème de consommation fraiches : les crémés glacés, mélange de crème et d'œufs additionnés de stabilisants et d'émulsifiants, sont refroidis à 4°C dans des cuves de maturation ou elles séjournent pendant 4 heurs.
  Cette phase addition du parfum choisi, le mélange est ensuite à 4°C, cette phase de traitement doit être menée rapidement en agitant le mélange, après congélation les crèmes glacées sont durcies à -25°C dans les chambres froides ou des tunnels et sont conservées à cette température jusqu'à leur distribution.
- Les fromages : Fromage frais
  Fromage affinés
- Les yaourts : les laits fermentés existent depuis des millénaires le kéfir et produit au moyen orient, le koumys est une boissonna à base de lait fermenté de jument, de chamelle ou d'ânesse et fabriquée en Asie centrale.
- La fabrication des yaourts industriels n'a été possible que des le début de 20^{ième} siècle (1917)
- Yaourt est préparé à partir de lait entier ou écrémé et pasteurisé.

Le lait est ensemence avec les bactéries lactique. L'ensemble est ensuite mis à fermenter pendant deux à trois heurs à 45°C.

Le yaourt final est un produit vivant et doit contenir 100 million de bactérienne qui donne au qui donne au yaourt son arôme et son goût.

Le yaourt doit être refroidi, puis stocker à une température comprise entre 2°C et 4°C.

1-3- Chaine de la production du lait et produits laitiers :

La production du lait et produit laitiers se fait par plusieurs étapes :

a- La reconstitution :

Cette opération consiste à mélanger l'eau de température +45°C à 50°C avec de lait en poudre d'une concentration de 92 g/L dans des tanks qui des agitateurs mécaniques.

b- La filtration :

Consiste à éliminer les impuretés microscopiques grumeaux :

c- La recombinaison :

Consiste à cette étape qu'on additionne du lait reconstitue et de la matière grasse fondu à 65°C à raison 2%.

d- Le dégazage :

Le dégazage est effectue généralement qu'à 75% sont rôle d'éliminer certaines odeurs caractéristiques des laits reconstitues qui proviennent de l'alimentation des vaches soit de l'activité enzymatique ou du traitement de la matière première.

e-Refroidissement :

Le lait est refroidi à une température de +4°C à +6°C avant d'être stocké dans tanks de 20000 L.

f- La pasteurisation :

C'est opération obligatoire pour débarrasser le lait et les produits laitiers de tous les germes pathogènes, cette pasteurisation est obtenue par des vapeurs chaudes provenant d'une installation de chaudière (échangeur de chaleur à plaque).

Pour la pasteurisation on distingue trois type qui dont :

Pasteurisation lente : 61°C à 63°C pendant 30min

Pasteurisation haute : 75°C à 80°C pendant 3min

Pasteurisation rapide (flache pasteurisation) : 81°C à 84°C quelques secondes.

1-4- Application de froid dans l'industrie laitière :

Le froid est un moyen de conservation à court ou a la longue durée produits alimentaire selon les besoins. Pour avoir une bonne conservation il faut maitre en évidence le triploïde frigorifique qui est :

1-Produit sain

2-Produit précoce

3- Froid continu

Pour les produits fabriques par l'industrie agroalimentaire (lait fromage …), le froid permet d'améliorer leurs qualités en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une optimisation des paramètres climatiques influençant des microorganismes.

Le tableau ci-dessous représente l'utilisation de froid :

Produit	**Processuelle**	**Fonction associés à l'utilisation de la fonde**	**T° recherchée**
Beurre	Refroidissement après pasteurisation réalisé par circulation d'eau glacée de la baratte (procédé en batch) ou dans un échangeur à plaque (procédé continue)	Ralentissement de développement bactérie et cristallisation des graisses	4,4°C
Fromage	Mûrissement des fromages en chambres froides	Contrôle de mécanisme de fermentation	Dépend de la nature de fromages ex : 7°C et 70% humidité
	Refroidissement en coûte d'élaboration	Ralentissement de développement bactérien	4,4°C

Crème glacés	Congélation partielle dans des échanges à surface raclée	Elaboration de la crème glacé avec la consistance recherche	-4,4°C à -9°C suivant la crème et la consistance recherche pont le produit
	Durcissement du produit pour stockage et transport	Durcissement de la crème pour le transport et le stockage dans des tunnels à circulation forcé d'air	-29°C à -35°C
	Refroidissement en tanks à (lait après traite)	Ralentissement à l'utilisation de froid	Refroidissement de la première traite de 32°C à 10°C pendant la première heure maintiens de 44°C
Lait	Refroidissement dans un échangeur à plaque après pasteurisation		
	Stockage et distribution		Entre 0,6°C et 4,4°C

Tableau 3-1 : utilisation de froid dans les processus l'élaboration des différents produit laitiers.

2 - Mode de refroidissement :

2-1 Refroidissement du lait cru :

Le froid ralentit le développement de la flore microbienne, mais il possède aussi un effet sélectif, lorsque le lait n'est pas refroidi, ou refroidi seulement à une température supérieur ou égale à 10°C, on assiste à une prolifération, des germes lactique qui provoquent l'acidification et la coagulation du d'autant plus rapidement que sa température élevée.

Lorsque le lait est refroidi à plus base température, entre 0°C et 10°C, la flore lactique ne se développe plus, ou presque plus mais il existe un groupe de micro organisme, les bactéries

psychro-trop qui sont encore capable de se développement en provoquant une dégradation des protéines de la matière grasse. Cette dégradation peut être à l'origine de défaut de goût (goût de rance putride, d'amer).d'autre part la conservation de lait à basse température 24h ou plus provoque des modifications psycho-chimique de lait et en particulier un allongement du temps de coagulation par présure

a- Refroidissement après pasteurisation :

Suivant qu'il subit une pasteurisation basse ou haute, le lait est chauffé à 73°C ou 83°C environ. Dans tous les cas, il est refroidi aussitôt après la pasteurisation proprement dite : ce refroidissement instantané se déroule en 3 temps le corps même du pasteurisation, par échanges successif à travers les plaques avec du lait cru entrant dans l'appareil de l'eau froide, puis de l'eau glacée.

b- Refroidissement de lait pasteurisé :

Le lait pasteurisé doit également être maintenu ou froid après la pasteurisation, da façon à éviter le développement de la flore microbienne qu'il contient encore, flore résistant au traitement thermique et flore et reconditionnement.

Légalement, aussitôt pasteurisé, le lait doit être refroidit à une température inferieure à 6°C et conservé jusqu'au moment de la vente aux consommateurs à une température inférieur ou égale à 10°C.

2-2 Refroidissement de lait en vrac :

Le refroidissement de lait en vrac sont constitué par :

Une cuve isolé thermiquement et destinée à recevoir le lait provenant de la traire

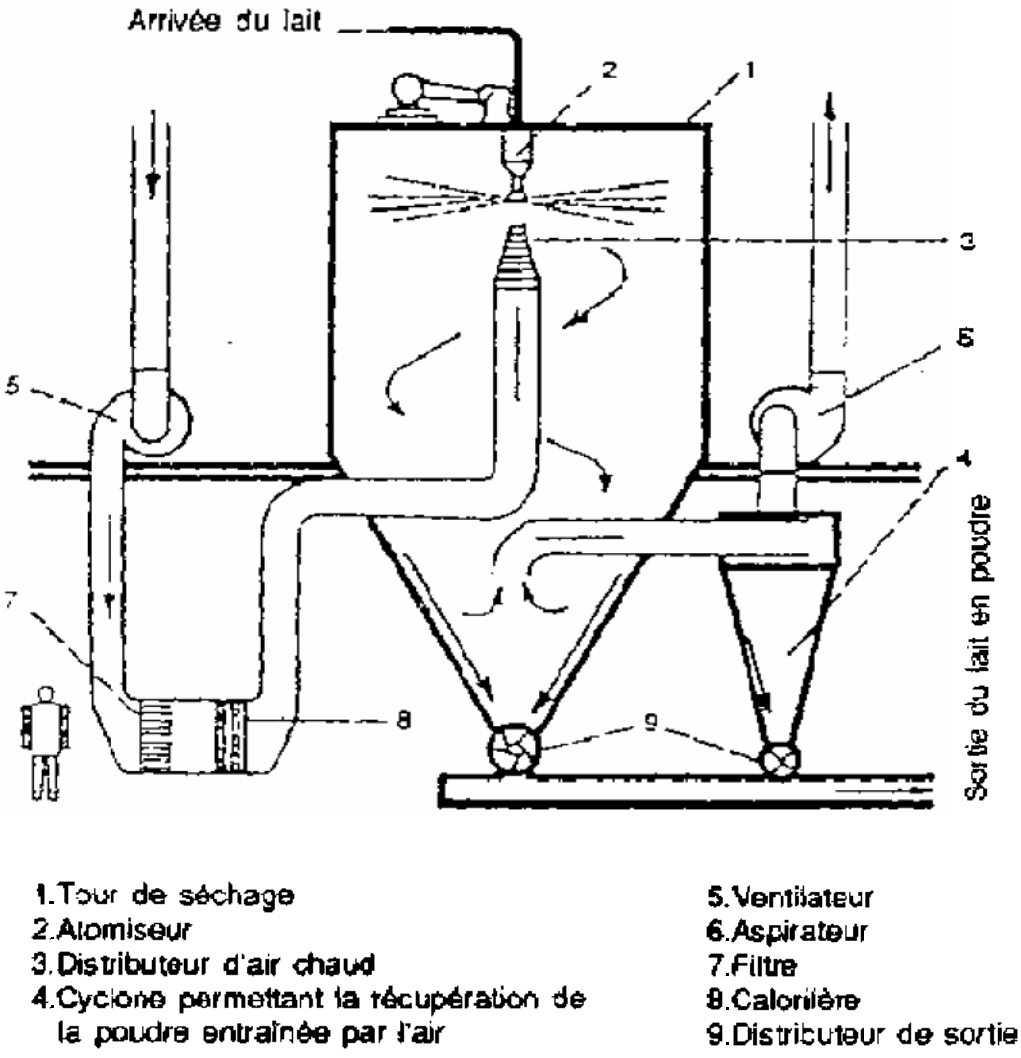
Un dispositif de réfrigérateur du lait

Un dispositif d'agitation du lait destiné à assurer des températures pendant le refroidissement de la teneur en matière grasse pendant la conservation du lait.

Un dispositif de nettoyage mécanique lorsque le volume nominal de l'appareil est égal ou supérieur à 2000 litres, ou lorsque l'appareil ne dispose que d'un trou d'homme comme ouverture, quelle que soit la capacité.



Fig3-1 : l'appareil de refroidissement en vrac

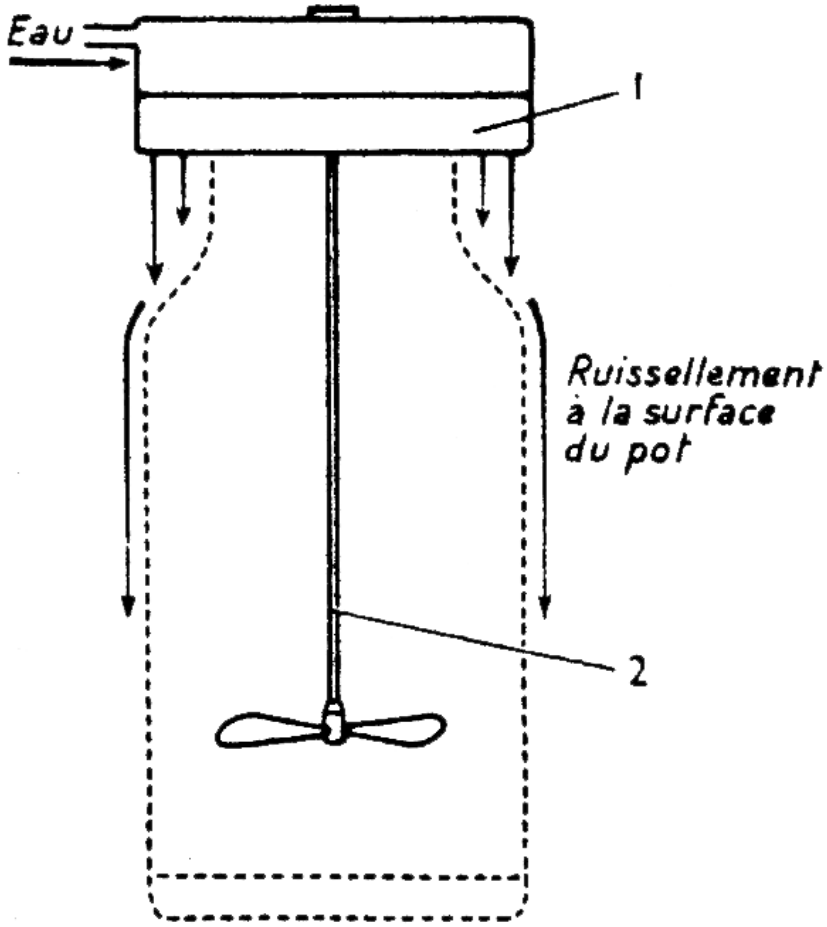


1.Tour de séchage
2.Atomiseur
3.Distributeur d'air chaud
4.Cyclone permettant la récupération de la poudre entraînée par l'air
5.Ventilateur
6.Aspirateur
7.Filtre
8.Calorifère
9.Distributeur de sortie

Fig 3-2.: schéma d'appareil de refroidissement de lait en cru

2-3 Refroidissement par ruissellement :

Le fluide frigoporteur ou fluide frigorigène circule à intérieur du tube on de plaque à l'extérieur des qu'elle le liquide à refroidir à ruisselle, les parois de cet échangeur sont généralement lisse et facile à nettoyer, ce mode de refroidissement qui autorise de coefficient de transfert élève et utilise pour le refroidissement de lait, ce type de refroidissement s'effectue dans les appareils pour ne passe des problèmes hygiène pour les données alimentaires.



1. Turbine à eau.
2. Agitateur à palettes.

Fig 3-3: schéma d'appareil de refroidissement par ruissellement

2-4 Procédé de congélation :

Les procédés de congélations rapides font appel aux principaux suivants :

Tunnel de congélation : ce procédé qui consiste à disposer la durée dans un courant d'air maintenu aux environ de – 30°C à – 40°C et a une vitesse l'ordre de 3 m/s.

Congélation par fluide cryogène : on peut procéder à la congélation des denrées en les disposent dans un flux d'azote évapore à partir d'azote liquide l'évaporation de l'azote liquide se produit à 195°C, cette technique qui est efficace

- **La durée de congélation par un fluide cryogénique :**

Elle dépend de facteur nombreux et très valable, entre autre la chaleur massique et la chaleur latente de congélation des denrées leur forme, leur texture, leur dimension, leur coefficient de transmission superficiel du produit leur disposition dans le congélateur, la température à laquelle elles sont soumises, le procédé utilise, etc.

La formule suivante donne la durée de congélation par un fluide cryogénique :

$$t = \frac{\Delta h \times \rho}{\Delta \Theta} \times \frac{1}{N} \times D\left(\frac{4D}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right)$$

Dans cette formule

Δh: est la quantité de chaleur à extraire de produit entre la température commençante et la température finale en (j/Kg)

ρ : la masse volumique en Kg/m^3

$\Delta\Theta$: l'écart de température entre la température de congélation et celle de medium de refroidissement en (°C) et en (K)

D : l'épaisseur à pièce congelé en (m)

λ : le coefficient de conductivité thermique du produit en (W/m.K)

α : le coefficient superficiel d'échange entre le médium et la surface du produit (tenant compte de l'emballage s'il y en a).

N : un coefficient qui dépend de la forme de la pièce à congeler (N=2 pour une plaque, 4 pour un cylindre, 6 pour une sphère).

T : est exprimé en (second).

La valeur (α) dépond des conditions dans lesquelles le produit sera congelé, dans l'air, sans emballage on peut admettre

$\alpha \neq 2$ 3 (W/ m² K) dans le cas de congélation par contact , par immersion ou part lait fluidise , α atteint environ 230N/m² K.

Celle de (λ) dépond de la nature de produit à congeler.

- **Durée de la congélation en jours :**

$$t' = \frac{2 \text{ fois l'épaisseut de la pièce à congeler}}{T° \text{ de congélateur}}$$

2-5 Application de froid au cours des processus de fabrication :

a- Chauffage :

Un mélange constitue de l'eau et de la poudre du lait est chauffe à 83°C dans un réchauffeur afin de permettre la d'association complète de la poudre dans l'eau , le réchauffeur est un échangeur thermique qui met en contact le mélange et la vapeur chaude provenant de la chaudière .

b- Pasteurisation et refroidissement :

La pasteurisation n'alter ni la composition ni la saveur ni la valeur nutritive du lait, tout en permettant une meilleur conservation de celui-ci le cas étudié, la pasteurisation du lait se fait en chauffant le liquide à une température de 85°C, puis en le refroidissement très rapidement jusqu'à 28°C pour bloquer l'acidité.

c- La fermentation :

La fermentation est une réaction biochimique de conservation de l'énergie contenue dans une source de carbone (glucose souvent) en une autre forme d'énergie directement utilisation par la cellule en l'absence de désoxygéné (milieu anaérobie) la fermentation reste le mode de transformation le plus courant en Afrique. Le lait fermenté est même souvent préféré au lait fermenté au lait frais, parce qu'il se conserve mieux. Qu'il est plus digeste et qu'on lui prête également des vertus thérapeutiques.

Les viandes et les poissons

3-Composition de viandes et poissons :

Selon l'organisation mondiale de la santé animale, la viande désigne toutes les parties comestibles d'un animal et considère le mot « animal », dans ce contexte « tout mammifère ou oiseau». Dans ce vocabulaire sont inclues la chaire des mammifères (Ovin, bovin, caprin, camelin …) et des oiseaux (poulet, dinde, pintade …). Mais la qualité de la viande est fonction de l'âge, du sexe, et de la race de l'animal.

Les viandes se caractérisent par une grande hétérogénéité, elles sont principalement Constituées de muscles striés squelettiques qui comportent aussi d'autres tissus en quantité très variable selon les espèces, les races, les âges, les régimes alimentaires et la région anatomique concernée. Ce sont surtout les tissus conjonctifs, adipeux parfois les os et la peau. Les viandes sont aussi classées selon la couleur en : Viandes rouges et viandes blanches et selon la richesse en graisse en: Viandes maigres et viandes plus ou moins riches en graisse. Les poissons représentent un apport en protéines d'aussi bonne qualité que la viande. Il contient en outre une quantité plus importante de substances azotées non protéiques (ammoniaque, urée…) qui lui donnent une odeur caractéristique. Le poisson contient en moyenne 20 % de protéines. Les huîtres et les moules 7 à 10 %.

4-Apports nutritionnels caractérisant les viandes et poisson de groupe :

- Protéines
- Minéraux : fer (viande, iode (poisson)
- Vitamines : groupe B ; A (foie)
- Pas de calcium et pratiquement pas de vitamine C
- Apports potentiels en lipides
- Apport en cholestérol

5- La conservation du poisson et viande :

La durée de conservation du poisson et de la viande dépend du degré d'acidité et de la teneur en eau du produit. Certaines influences extérieures comme l'oxygène (de l'air), les micro-organismes, la température de conservation, la lumière et la migration d'eau jouent aussi un rôle important. Sous les hautes températures ambiantes des tropiques, la viande et le poisson frais s'altèrent très rapidement. Si l'on veut garder le produit plus d'un jour, il faut le conserver. Une autre méthode de conservation consiste à le réfrigérer ou à le congeler. Il existe deux possibilités de stockage de la viande et du poisson frais à basse température ?la

réfrigération de -1° à +4°C qui freine la croissance des micro-organismes. La congélation de -18° à -30°C qui arrête complètement la croissance bactérienne.

Les basses températures freinent le déroulement des processus (bio) chimiques, physiques et microbiologiques et empêchent l'altération. Pour obtenir une plus longue durée de conservation, il faut abaisser très rapidement la température du produit. Une congélation trop lente provoque la formation de cristaux de glace qui portent atteinte à la structure du produit.

6- Règles d'application du froid :

Les trois règles à respecter dans l'application du froid pour le traitement des produits de consommation ont été précisées dès 1928 par ALEXANDRE MONVOISIN. Elles sont basés sur :

- La réfrigération appliquée à un produit sain (viande sans souillure).
- Une réfrigération précoce (aussitôt après l'abattage).
- Une réfrigération continue, donc une chaîne de froid ininterrompue**.**

7- Facteurs d'altération :

Parmi les facteurs d'altération des produits conservés par réfrigération il y a :

7-1 Teneur en eau libre de la viande et poison :

L'eau libre est une eau non liée à des sels (Na Cl) ou à des molécules (glucides). Cette eau peut être éliminée de l'aliment par évaporation. Elle favorise la croissance bactérienne.

Les bactéries pathogènes se développent à des activités d'eau comprises entre 0.9 et 1, celle des levures se situe entre 0.87 et 0.9 .

7-2 Humidité de l'air :

Selon l'humidité des chambres froides, deux types d'altérations sont susceptibles d'apparaitre sur les denrées conservées par réfrigération. Une atmosphère sèche ralentie la prolifération microbienne, on assiste à une putréfaction lente due essentiellement aux moisissures de surface (Aspergillus, Cladosporium, Penicillium…) et des levures **(**Candida, Torula….). Les hautes teneurs en eau de l'atmosphère, favorisent la croissance bactérienne.

Il s'agit essentiellement des germes tels que : *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, entérobactéries …, formant à la surface de la viande un enduit muqueux résultant de la juxtaposition des cellules microbiennes .

7-3 Teneur en oxygène :

Les microorganismes aérobies se développent en présence d'oxygène, alors que ceux strictement anaérobies prolifèrent en absence d'oxygène.

7-4 Température d'entreposage :

La température idéale pour le développement des microorganismes se situe entre 7 et 55°C. Mais pour chaque groupe de bactéries il y a des températures spécifiques comme l'indique le tableau suivant :

Groupe	Température minimale	Température optimal	Température maximal
Psychrophile	-15 °C	15 à 20°C	25 °C
Psychotropes	0 à 5°C	25 à 35 °C	37°C
Mésophiles	10 à 20 °C	37°C	45°C
Thermophiles	25 à 45°C	50 à 90°C	65 à 90 °C

Tableau 3-4: Bactéries et température de croissance

7-5 Degré d'acidité :

Le pH optimum de croissance bactérienne (pathogènes) est neutre, proche de 7; les bactéries se développent rarement à des pH acides sauf les bactéries acidophiles ou à des pH alcalins sauf les bactéries basophiles. L'espèce vibriocholerae se multiplie à pH=9, *E coli* se développe dans une fourchette plus large (4.4 à 9) .

8-Réfrigération et congélation du poisson :

On réfrigère à 0°C souvent les poissons entiers (dont on a retiré les viscères et les branchies) ou les filets en les recouvrant de glace. On remplit une boîte avec des couches alternées de poisson et de glace, la dernière couche étant une couche de glace. Il faut utiliser au moins autant de glace que de poisson. Lorsque la glace est fondue, il faut la remplacer pour maintenir le poisson à 0°C. Le poisson gras surtout doit être réfrigéré rapidement pour ralentir l'oxydation de la graisse.

Le poisson peut aussi être stocké en cellules de réfrigération : comme la température est juste au-dessus de 0°C, la glace fond et le poisson reste frais. Le poisson ne gèle donc pas. Les boîtes ne doivent pas être posées sur le sol, ni contre un mur, ni les unes contre les autres, mais empilées sur des palettes, à quelque distance du mur, pour permettre la circulation de

l'air. Si l'on veut conserver le poisson plus de 2 ou 3 semaines, il faut le congeler. Dans les cellules de congélation, la température conseillée est de -30°C. Un poisson de bonne qualité congelé à -30°C juste après la pêche se conserve très longtemps.

Quelques exemples de durée de conservation sont donnés dans le tableau :

Produit		température	Durée de conservation
Réfrigération	Filet de cabillaud	0°C	11 jours
		3°C	5 jours
		10°C	25 heurs
	Truite d'élevage (nettoyer et emballer sous vide)	0°C	18 heurs
	Colin (nettoyer)	5°C	5 jours

Tableau3-5 : Durée de conservation du poisson en fonction de la température

	Produit de mer	Durée pratique de conservation [mois]		
		-12°C	-18°C	-24°C
Poisson gras		3	5	>9
Poisson maigre		4	6	>12
Homard (pans leur carapace, cuit)		4	6	>12
Crabe (dans leur carapace, cuites)		4	6	>12
Crevettes (dans leur carapace, cuites)		2	5	>12
Crevettes (décortiquées, cuites)		2	5	>9
Cabillaud		4	6	>9
Hareng		3	5	>9

Tableau 3-6: les durées de conservation par différentes température de Congélation

9-Réfrigération et congélation de la viande :

Les méthodes de réfrigération et de congélation sont aussi appliquées pour la conservation de la viande. Il faut abaisser rapidement la température de la carcasse d'environ 40°C à 0-5°C pour limiter la dégradation microbiologique à la surface de la viande. Après ce premier refroidissement, la viande est réfrigérée ou congelée. Le prétraitement pour la réfrigération comprend l'abattage et le découpage en quartiers de la carcasse. La réfrigération optimale d'un quartier fait perdre à la viande de 1 à 3% de son eau pendant les premières 24 heures. La réfrigération de -1°C à +3°C peut être utile pendant le temps compris entre l'abattage et la vente ou pendant un long transport (par ex. de l'Argentine à l'Europe). La réfrigération de la viande est aussi utilisée pour faire mûrir la viande, ce qui la rend plus tendre. Cela s'applique surtout à la viande de bœuf. La circulation de l'air est également très importante dans les cellules de réfrigération.

On congèle parfois les quartiers de carcasse, mais on peut les désosser auparavant pour diminuer leur volume. La viande est découpée en gros morceaux. La congélation de -10°C à -18°C des quartiers de bœuf, prend de 4 à 6 jours. Le stockage de [2]la viande congelée se fait généralement entre -12°C et -20°C.

A cette température, la durée de conservation de la viande de bœuf est d'au moins 1 an, mais celle de la viande de porc est plus courte. Cela est dû à l'oxydation de la graisse qu'elle contient. Le tableau 6 donne quelques exemples de durée de conservation de plusieurs sortes de viande à différentes températures. Cependant cette durée dépend de la qualité de la viande et des conditions de conservation.

 Viandes et volailles	Durée pratique de conservation [mois]		
	-12°C	-18°C	-24°C
Bœuf (carcasse non emballée)	8	15	>24
Bœuf (morceaux, steaks)	6	10	15
bœuf haché	6	10	15
Veau (carcasse non emballée)	6	12	15
Veau ‘découpé)	6	12	15
Agneau (carcasse non emballée)	18	24	>24
Agneau (découpé)	12	18	24
Porc (carcasse non emballée)	6	10	15
Porc (découpé)	9	10	15
Lard-maigre-bacon (tranche sous vide)	12	12	12
Poulet entier	9	18	>24
Dinde entière	8	15	>24
Canard, oie (entiers)	6	12	>18
Foie	4	12	18

Tableau 3-7 : les durées de conservation pour différentes températures de congélations

10-Influence de la microflore psychrophile et psychotrope sur la viande et poisson réfrigérées :

La réfrigération empêche la multiplication de nombreux germes mais pas celle des germes psychrophiles, capables de croître à basses températures (3°C et 5°C) tel que les *Pseudomonas* et les Achromobacters. Les germes psychrophiles se développent à 0°C en une ou deux semaines. Les psychotropes sont capables de s'adapter et de se développer aux températures proches de 0°C

Légumes et fruits

11-Apports nutritionnels caractérisant les aliments de ce groupe :

- Fibres
- Minéraux
- Vitamines : C, bêta-carotène, vitamines du groupe B
- Glucides
- Pas de lipides et apport de protéines négligeable

12-Composition de légumes :

Les légumes frais proviennent de toutes les parties de la plante : racines (carottes, navet…), tubercules (pommes de terre), tiges (céleri branche), feuille (épinard), fleur (chou-fleur), fruit (tomate, courgette). Ils se caractérisent par une teneur en eau très importante (90 % en moyenne), un apport en *glucides modéré* : 1 à 6 % pour les parties aériennes des plantes (salades, épinards, courgettes, tomates…) et 9 % environ pour les racines (carottes, céleri…).
Les légumes représentent un apport important de *potassium*. On y trouve également du *calcium* (surtout dans les choux), du magnésium, du fer et du cuivre (légumes à feuilles type épinard), du soufre (choux, oignons, ail, poireaux, navets, radis) et de nombreuses autres matières minérales.
Les légumes sont riches en vitamines hydrosolubles : vitamine C (choux, légumes à feuilles, tomates), provitamine A ou bêta-carotène (partie colorée des plantes : légumes à feuilles vertes, carottes…) et vitamines du groupe B.
Les *fibres* des plantes se composent surtout de cellulose, d'hémicellulose et de matières pectiques.

13-La composition de fruits :

La composition des fruits est semblable à celle des légumes. Leur teneur en glucides est cependant plus élevée. Il s'agit le plus souvent de sucres (de fructose mais aussi de saccharose ou de glucose et plus rarement d'amidon (banane, châtaigne). L'apport en *sucres* est très variable. Il est peu important pour les agrumes, les groseilles, les fraises, les framboises, les mûres, le melon et la pastèque (5 à 10 %).
Lignine, hémicellulose et matières pectiques. Certains fruits sont particulièrement riches en pectines (pomme, coing, groseille).

14-La conservation de légumes et fruits :

La détérioration de fruits et légumes au cours du stockage dépend largement de la température. Une façon de ralentir ce changement et ainsi augmenter la longueur de fruits et légumes temps peut être stocké, est en abaissant la température à un niveau approprié. Il faut se rappeler que si la température est trop basse, le produit sera endommagée et aussi que dès que le produit quitte l'entrepôt frigorifique, la détérioration recommence et souvent à un rythme plus rapide.

Il est essentiel que les fruits et légumes ne sont pas endommagées pendant la récolte et qu'ils sont toujours propres. Endommagé et meurtri produits ont beaucoup plus courtes durées de conservation et de très mauvais aspect après stockage.

Produits sale peut introduire des parasites et de moules dans le magasin.

Le produit doit être récolté soigneusement à l'aide d'un couteau tranchant en acier inoxydable.

Les fruits et légumes ne doivent pas être placés sur le sol où ils pourraient ramasser la saleté.

Soit un panier de récolte propre ou matelas propres doivent être utilisés.

Il est essentiel que les fruits et légumes sont récoltés au moment de la récolte correcte.

Manipulation

Il est important que le produit ne soit pas sale ou endommagé lors de la manipulation. Une manipulation soigneuse devrait être la règle. La meilleure option est pour le produit à préparer pour le stockage dans le domaine et soigneusement placé dans les conteneurs de stockage utilisés dans l'entrepôt frigorifique. Cela réduit considérablement la quantité de manutention et limiter les dégâts à un minimum. Il est essentiel que le produit soit manipulé et placé dans le magasin le plus rapidement possible car les retards entre la récolte et le refroidissement peuvent réduire considérablement la durée de stockage.

Préparation

Si le produit est sale, il doit être nettoyé avant stockage. L'eau utilisée doit être gardé propre ou des spores de champignons sera répandu dans le produit.

Certains fruits et légumes ont besoin de leurs feuilles extérieures retirées avant le stockage. Cependant, généralement, il est préférable de laisser les feuilles pendant le stockage afin de réduire la perte d'humidité, puis retirez-les avant de les vendre.

Refroidissement préliminaire (pré refroidissement)

le produit dans de l'eau froide pour enlever la chaleur du champ peut réduire les besoins énergétiques de la boutique. Toutefois, cela peut se propager les spores de champignons dans tout le produit. Une alternative appropriée est de choisir le produit soit tôt le matin quand il

fait frais ou tard dans la soirée et laisser toute la nuit pour refroidir.

15-Les conditions de stockage :

15-1 Température :

Tous les fruits et légumes ont une «température critique» en dessous de laquelle les réactions indésirables et irréversibles ou «dommages de froid 'a lieu. Carottes par exemple noircissent et deviennent mous, et la structure de la cellule de pommes de terre sont détruites. La température de stockage doit toujours être au-dessus de cette température critique. Il faut veiller à ce que, même si le thermostat est réglé à une température supérieure à la température critique, l'oscillation thermostatique de la température ne conduit pas à la température de stockage tombant

15-2 Humidité relative :

L'activité de l'eau donne des informations sur la stabilité physique, mécanique, chimique et micro biologique d'un produit ; elle influence le taux de croissance des organismes indésirables comme bactéries ou champignons, lesquels produisent des "toxines" ou d'autres substances nocives. Elle influe aussi sur d'autres réactions chimiques/biochimiques (par exemple la réaction Maillard) qui se produisent en fonction du taux disponible d'eau libre. Fondamentalement les caractéristiques suivantes du produit dépendent de l'eau :

- Stabilité microbiologique (croissance)
- Stabilité chimique
- Contenu de protéines et vitamines
- Couleur, goût, et valeur nutritive
- Stabilité de la composition et durabilité
- Stockage et emballage
- Solubilité et texture

16- La durée de conservation de légumes et fruits :

Les tableaux suivants représentent quelque produit (fruit et légume) et leur duré de vie de différentes température de congélation.

Légumes	Durée de conservation [mois]		
	-12°C	-18°C	-24°C
Asperges (à point verte)	3	12	>24
Haricots vert	4	15	
Brocoli	-	15	
Choux Bruxelles	6	15	
Carottes	10	18	
Choux-fleurs	4	12	
Champignons	2	8	
Petit pois	-	6	
Poivrons rouges et verts	-	6	12
Pomme de terre	9	24	<24
Epinard	4	18	<24
Oignons	-	10	15
Poireaux blanchis	-	18	-
Pois, fève de lima	2	8	12

Tableau 3-8 : la durée de conservation des légumes par différentes températures.

	Fruit	Durée pratique de conservation [mois]		
		-12°C	-18°C	-24°C
Framboises-fraises (crues)		5	24	>24
Framboises- fraises (avec sucre)		3	24	
Pêche-abricot-cerise (crues)		4	18	
Pêche-abricot-cerise (avec sucre)		3	18	
Ananas		3	12	
Kiwi		4	12	
Mangue		5	12	
Pommes		8	18	
Poire		5	15	
Raisin		4	12	
Prune		5	18	

Tableau 3-9 : la durée de conservation des fruits.

Conclusion :

En général nous avons constaté que l'utilisation de chambres froides est très important dans la zone d'alimentation avec plusieurs types de refroidissement (réfrigération congélation et même surgélation) et que sont nécessaires pour maintenir la suivie des matériaux utilisable.

Chapitre 4 : Modélisation des paramètres du R134a dans une chambre froide.

1-Généralités :

Il existe différents types de fluides frigorigènes sur le marché. En voici les critères de choix :

1-1.L'impact environnemental :

Reprenons différents fluides en fonction de leur impact environnemental dans le tableau ci-dessous. Ce tableau met bien en évidence le fait que les HFC sont en sursis comme le prévoit la réglementation européenne (règlementation dite F-gaz). Celle-ci prévoit en effet une réduction d'utilisation de 79% de l'utilisation des gaz fluorés d'ici 2030 par rapport à l'utilisation faite en 2015.

Aujourd'hui les solutions de remplacement ne sont pourtant si pas évidentes. Il faudra s'orienter vers des (nouveaux) fluides à faible Potentiel de Réchauffement Global (PRG) ou des fluides naturels.

Cependant, pour ces derniers, il faudra faire face aux contraintes de sécurité associées au CO2 (haute pression) au propane et au butane (inflammabilité) et à l'ammoniac (toxicité).

Remarque :

certains imaginent qu'à défaut de trouver le gaz parfait, on pourrait produire le froid dans des machines frigorifiques très compactes (donc contenant peu de fluide), puis transférer le froid par des caloporteurs (eau glucosée, CO_2,.). Dans ce cas, le problème du fluide ou de sa sécurité est moins crucial.

1-2-L'impact énergétique (ou qualité thermodynamique) :

Par ses propriétés thermodynamiques, le fluide frigorigène influence la consommation énergétique de la machine frigorifique. Pour illustrer ce point, nous reprenons ci-dessous les résultats d'une étude comparative entre 5 fluides différents, utilisés dans une même machine, avec les mêmes conditions de fonctionnement.

Dans chaque cas, l'objectif est de produire une puissance frigorifique de 100 kW.

	NH3	**R-134a**	**R22**	**Propane**	**R-404A**
Puissance effective sur l'arbre [kW]	30,7	30,9	32,1	33,1	35,1
Coefficient de performance frigorifique	3,26	3,24	3,12	3,03	2,85
Débit volumique balayé dans le compresseur [m³/h]	239	392	224	250	217
Débit volumique de liquide frigorigène [m³/h]	0,53	1,91	1,75	2,42	2,70
Température de refoulement de la compression réelle adiabatique [°C]	156	60	87	63	59

Tab 4-1 : les paramètres des fluides frigorigènes.

1-3 Hypothèses de l'étude :

- Cycle à compression mono étagée;
- Température d'évaporation : - 15°C;
- Surchauffe à la sortie de l'évaporateur : 5 K;
- Surchauffe à l'entrée du compresseur : 10 K;
- Température de condensation : 30 °C;
- Sous-refroidissement en sortie de condenseur : 5 K

- Taux d'espace mort du compresseur : 3 %.

1-4 Analyse :

Les températures de refoulement de la compression indiquée sont légèrement plus élevées qu'en réalité parce que le compresseur est placé dans une situation de non-échange avec l'extérieur (adiabatique). Par exemple, le compresseur réel à l'ammoniac qui échangerait 1/10 de sa puissance sur l'arbre aurait une température au refoulement d'environ 142°C.

On constate que le groupe au R-404A consomme 14 % de plus que le groupe à l'ammoniac. La machine équipée de propane n'est pas très performante non plus.

Le R-134a est très performant sur le plan énergétique. Par contre, le débit volumique balayé par le compresseur est nettement plus élevé, ce qui va augmenter la taille du compresseur et des conduites d'aspiration (coût d'investissement plus élevé).

L'ammoniac présente un très faible débit volumique de liquide frigorigène et donc un faible diamètre de la conduite de liquide.

Reprenons les chiffres du COP frigorifique en partant d'une référence 100 pour le R-22 :

	NH3	**R-134a**	**R22**	**propane**	**R-404A**
Coefficient de performance frigorifique	3,26	3,24	3,12	3,03	2,85
Si le R-22 est pris en référence 100 :	105	104	100	97	91

Ttab 4-2 : le efficients de performance de chaque fluides.

Des résultats similaires ressortent d'une autre étude relatée par l'ASHRAE, avec comme différence notable un coefficient 99 pour le R-404A. Il faut dire que ce genre d'étude est fonction des options choisies : prendre la même machine frigorifique et changer juste le fluide, ou optimiser tous les composants en fonction des caractéristiques de chaque fluide pour produire la même puissance.

Cette deuxième étude fournit les coefficients pour d'autres fluides :

R-410A : 99

R-407C : 95

A noter que les débits demandés par le R-407C sont, à 1 % près, identiques à celui du R-22 : il a justement été conçu comme fluide de remplacement. Il est malheureusement zéotrope et présente donc un glissement de température lors du changement d'état (un "glide") de 7,2 °C, ce qui lui fait perdre 5 % de rendement énergétique.

Remarque :

L'ammoniac et le R-134a présentent une performance énergétique meilleure, mais cet avantage n'est pas suffisant que pour conclure sur ce seul critère.

2-calcul des propriétés thermodynamique du R134-a :

2-1 Equation de l'état de vapeur saturante :

Pour le réfrigérant R134-a en prend l'équation suivante comme équation d'état :

$$P=\frac{r.T}{v-b}+\sum_{i=2}^{5}\frac{A_{1+B_1T+ce^{-kTr}}}{(v-b)'}$$

Les dérivées partielles de la pression vis-à-vis de v et T s'expriment alors ainsi :

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T=-\frac{rT}{(v-b)^2}-\sum_{i=2}^{5} i\frac{A_i+B_iT+C_ie^{-kT_r}}{(v-b)^{i+1}}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v=\frac{r}{(v-b)}+\sum_{i=2}^{5}\frac{B_i-C_i\frac{k}{T_c}e^{-kT_r}}{(v-b)^i}$$

On commence le calcul par deux valeurs initiales, l'une d'elles peut être le volume massique critique v_c, pour ensuite déterminer les pressions ces pressions sont comparées à la pression de saturation qu'on peut obtenir à la même température, si la différence de l'une des deux pressions avec la pression de saturation est inférieure à une certaine tolérance fixée au préalable, alors la valeur de *v* qui a conduit au calcul de p(v,T) est la bonne, autrement l'itération se poursuit jusqu'à ce que p(v,T) converge vers p(T). Voir la figure suivante :

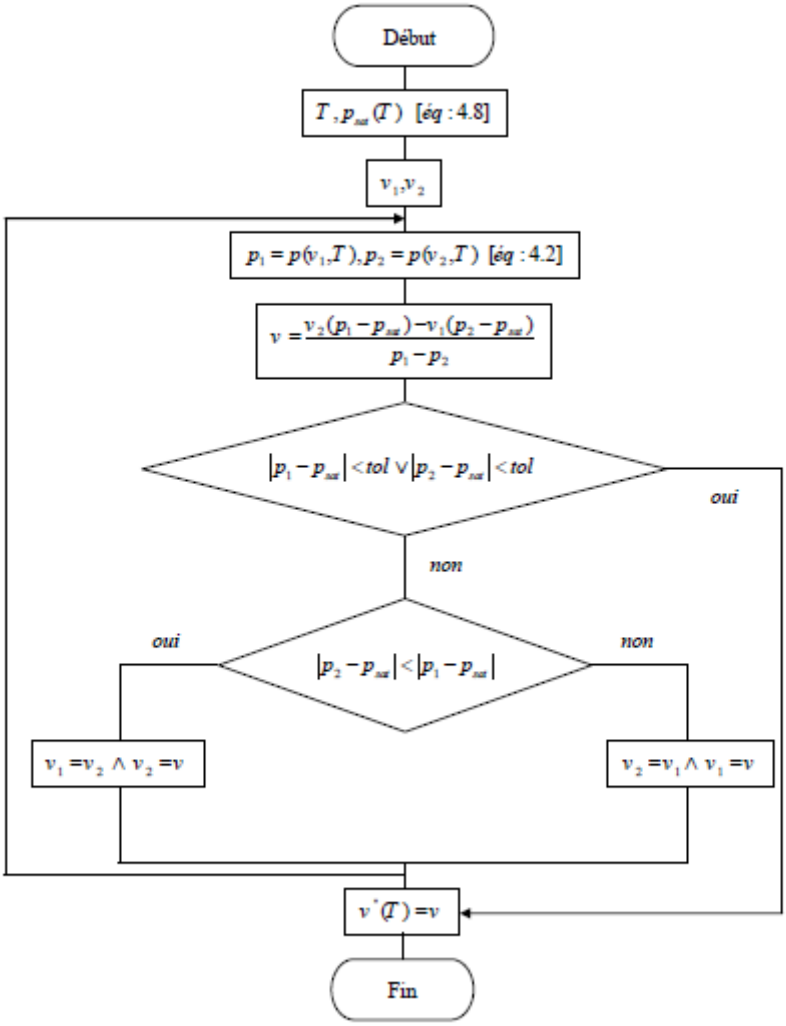


Figure 4.1 : Méthode de la sécante pour calculer le volume massique de la vapeur saturée.

2-2 EXPRESSIONS DES GRANDEURS C_v, C_p, L_v, h et s :

Le calcul de Cv se fait sans difficulté à partir de la relation (3.70), étant donnée la forme de l'équation d'état *p=f(v,T)* explicite en pression. Les expressions du terme intégral de cette relation sont les suivantes :

A partir de l'equation d'etat :

$$\int_{\infty}^{v}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v dv = -\sum_{i=2}^{5}\frac{C_i k^2 e^{-kT}}{(i-1)(v-b)^{i-1}} - C_6 k^2 e^{-kT}\frac{1}{\alpha}\left[\frac{1}{e^{\alpha v}} - c\ln\left(1+\frac{1}{ce^{\alpha v}}\right)\right]$$

Pour le R134-a on a d'abord :

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v = \sum_{i=2}^{5} \frac{C_i \left(\frac{k}{T_c}\right)^2 e^{-kT_r}}{(v-b)^i}$$

Puis :

$$\int_{\infty}^{v} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v dv = -\sum_{i=2}^{5} \frac{C_i \left(\frac{k}{T_c}\right)^2 e^{-kT_r}}{(i-1)(v-b)^{i-1}}$$

La dérivée de p_{sat} par rapport à T est :

$$\frac{dp_{sat}}{dT} = p_{sat} \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{9} (i-2) a_i T^{i-3} + \frac{a_{10} + a_{11} T}{T} + a_{11} \ln T - \frac{a_{12} + a_{13} T}{T(a_{14} - T)} - \frac{a_{12}}{T^2} \ln(a_{14} - T) + \\ 14 a_{15} T^{13} - \frac{3}{2} \left(\frac{a_{16}}{T} + a_{17}\right)(a_{18} - T)^{\frac{1}{2}} - \frac{a_{16}}{T^2}(a_{18} - T)^{\frac{3}{2}} \end{array} \right]$$

L'expression propre au R134a est la suivante :

$$\frac{dp_{sat}}{dT} = p_{sat} \cdot \left[\sum_{i=1}^{4} (i-2) a_i T^{i-3} - \frac{a_{12} + a_{13} T}{T(a_{14} - T)} - \frac{a_{12}}{T^2} \ln(a_{14} - T) \right]$$

Cette approche a été écartée de notre démarche, vu les résultats insignifiants qui ont été obtenus, dont l'expression est la suivante :

$$L_v = A + B.y + C.y^2 + D.y^3 + E.y^4$$

Avec :

$$Y = (1 - T_r)^{1/3}$$

le calcul de l'enthalpie et de l'entropie massiques peut se faire entre deux points donnés de la phase gazeuse. On choisit habituellement un point de référence et des valeurs de référence en ce point. Les références adoptées sont les suivantes dans le système international :

//

Fluide	$T_{ref}(K)$	$h'_{ref}(kJ/kg)$	$s'_{ref}(kJ/kg.K)$
R717	273.15	500	2
R14	173.15	200	1
Autres	273.15	200	1

Tableau 4-3 : les caractéristiques entre deux points pour deux fluides frigorigènes .

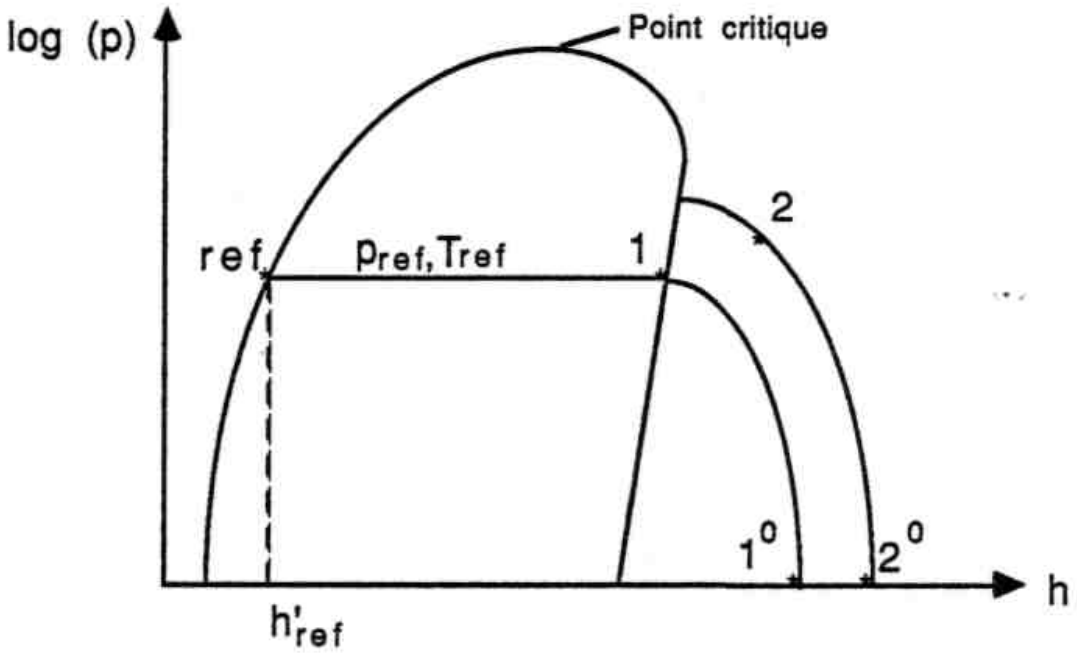


Figure 4.2 : Calcul de l'enthalpie au point 2 en fonction de l'enthalpie au point de référence.

Le calcul de h et s en un point donné 2 va donc se faire de la façon suivante :

- Le point 1 choisi est celui correspondant à la vapeur saturée à, ce qui permet d'écrire:

$$\begin{cases} h_1 = h'_{ref} + L_v(T_{ref}) \\ s_1 = s'_{ref} + \dfrac{L_v(T_{ref})}{T_{ref}} \end{cases}$$

- On peut ensuite calculer h_2 et s_2 .

Les expressions analytiques de l'enthalpie et de l'entropie massiques en un point donné de la phase gazeuse (p, v, T) sont alors obtenues à partir des relations suivantes :

$$h = h_{ref}^{'} + L_v(T_{ref}) + \int_{\infty}^{v}\left(T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p\right)_T dv + \int_{v_{ref}}^{\infty}\left(T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p\right)_{T_{ref}} dv + \int_{T_{ref}}^{T} C_v^0(T)dT + pv - p_{ref}v_{ref}^{''}$$

$$s = s_{ref}^{'} + \frac{L_v(T_{ref})}{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T}\frac{C_v^0(T)}{T}dT + \int_{v}^{\infty}[(\frac{\partial p}{\partial T})_v]_T\, dv + \int_{\infty}^{v_{ref}^{''}}[(\frac{\partial p}{\partial T})_v]_{T_{ref}}\, dv$$

Expressions dans lesquelles V''$_{ref}$ est le volume massique de la vapeur saturée à la température de référence.

La corrélation utilisée pour C_v^0 aboutit aux expressions :

$$\int_{T_{ref}}^{T} C_v^0(T)dT = \sum_{\substack{i=0\\ i\neq 4}}^{11}\frac{C_i}{i-4}(T^{i-4} - T_{ref}^{i-4}) + C_4 \ln\frac{T}{T_{ref}}$$

$$\int_{T_{ref}}^{T}\frac{C_v^0(T)}{T}dT = \sum_{\substack{i=0\\ i\neq 5}}^{11}\frac{C_i}{i-5}(T^{i-5} - T_{ref}^{i-5}) + C_5 \ln\frac{T}{T_{ref}}$$

Les expressions propres au R134a, sont :

$$\int_{T_{ref}}^{T} C_v^0(T)dT = \sum_{i=5}^{7}\frac{C_i}{i-4}(T^{i-4} - T_{ref}^{i-4}) + C_4 \ln\frac{T}{T_{ref}}$$

$$\int_{T_{ref}}^{T}\frac{C_v^0(T)}{T}dT = \sum_{\substack{i=4\\ i\neq 5}}^{7}\frac{C_i}{i-5}(T^{i-5} - T_{ref}^{i-5}) + C_5 \ln\frac{T}{T_{ref}}$$

Les expressions finalement programmées seront alors, en fonction de l'équation d'état :

$$h = h_{ref}^{'} + L_v(T_{ref}) + \left\{\begin{array}{l}\sum_{\substack{i=0\\ i\neq 4}}^{11}\frac{C_i}{i-4}T^{i-4} + C_4 \ln T + pv + \sum_{i=2}^{5}\frac{A_i + C_i(1+kT)e^{-kT}}{(i-1)(v-b)^{i-1}} + \\ (A_6 + C_6(1+kT)e^{-kT})\frac{1}{\alpha}\left[\frac{1}{e^{\alpha v}} - c\ln\left(1+\frac{1}{ce^{\alpha v}}\right)\right]\end{array}\right\} - f(p_{ref}, v_{ref}^{''}, T_{ref})$$

Celle spécifique au R134a, est la suivante :

$$h = h_{ref}^{'} + L_v(T_{ref}) + \left\{ \sum_{i=5}^{7} \frac{C_i}{i-4} T^{i-4} + C_4 \ln T + pv + \sum_{i=2}^{5} \frac{A_i + C_i(1 + k\frac{T}{T_c})e^{-kT_r}}{(i-1)(v-b)^{i-1}} \right\} - f(p_{ref}, v_{ref}^{"}, T_{ref})$$

Relation dans laquelle $f(P_{ref},V_{ref},T_{ref})$ est la même expression qu'entre accolades, prises à la température de référence à l'état vapeur saturée.

$$s = s_{ref}^{'} + \frac{L_v(T_{ref})}{T_{ref}} + \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{i=0 \\ i\neq 5}}^{11} \frac{C_i}{i-5} T^{i-5} + C_5 \ln T + r\ln(v-b) - \sum_{i=2}^{5} \frac{B_i - C_i \frac{k}{T_c} e^{-kT}}{(i-1)(v-b)^{i-1}} + \\ (B_6 - C_6 k e^{-kT}) \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{e^{\alpha v}} - c\ln\left(1 + \frac{1}{ce^{\alpha v}}\right) \right] \end{array} \right\} - g(v_{ref}^{"}, T_{ref})$$

Celle spécifique au R134a, est la suivante :

$$s = s_{ref}^{'} + \frac{L_v(T_{ref})}{T_{ref}} + \left\{ \sum_{\substack{i=4 \\ i\neq 5}}^{7} \frac{C_i}{i-5} T^{i-5} + C_5 \ln T + r\ln(v-b) - \sum_{i=2}^{5} \frac{B_i - C_i \frac{k}{T_c} e^{-kT_r}}{(i-1)(v-b)^{i-1}} \right\} - g(v_{ref}^{"}, T_{ref})$$

Relation dans laquelle $g(V''_{ref},T_{ref})$ est la même expression qu'entre accolades, prises à la température de référence à l'état vapeur saturée.

2.3 Pression de vapeur saturante :

Lorsque la phase vapeur d'un corps pur est en équilibre thermodynamique avec son liquides, l'égalité de leurs : potentiel chimique, température et pression respectifs conduit à la célèbre équation de Clapeyron :

$$\frac{dp_{sat}}{dT} = \frac{L_v}{T(v'' - v')}$$

Beaucoup de corrélations pour le calcul de p_{sat} ont pour point de départ la relation. La plus simple d'entres elles : est la relation de Clapeyron qui suppose la constance du membre de droite dans l'équation précédente vis-à-vis de la température :

$$\ln p_{sat} = A - \frac{B}{T}$$

Le calcul des deux coefficients A et B peut se faire grâce à la connaissance de deux paramètres (par exemple : pression critique et température d'ébullition). La relation est une application de la loi des états correspondants.

La précision de cette équation n'est satisfaisante sur toute l'étendue de la température. On peut en améliorer la précision en utilisant le facteur acentrique de Pitzer :

$$\ln p_{sat(r)} = f^{(0)}(T_r) + w f^{(1)}(T_r)$$

Les fonctions $f^{(0)}$ et $f^{(1)}$ ont été établies par Lee et Kesler (1975) :
Antoine (1888) a proposé une modification de l'équation de Clapeyron pour en améliorer la précision :

$$\ln p_{sat} = A - \frac{B}{T + C}$$

Certaines hypothèses sur l'évolution relative du rapport $L_v(v''-v')$ en fonction de L_v et (v''-v') permettent d'écrire un développement limité de la relation . Reidel 1954 a complété ce développement limité par un terme correctif fonction de T^6 :

$$\ln p_{sat} = A + \frac{B}{T} + C\,lnT + DT^6$$

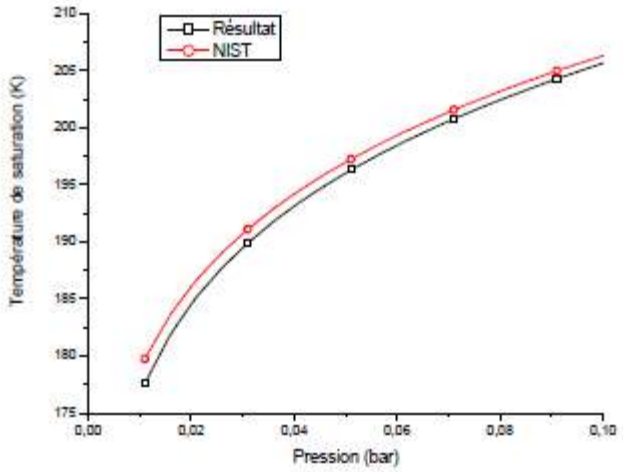
Et de celle proposée par ekroth 1979 :

$$\ln p_{sat} = \sum_{i=1}^{9} a_i T^{i-2} + (a_{10} + a_{11}T)\ln T + (\frac{a_{12}}{T} + a_{13})\ln T + a_{15}T^{14} + (\frac{a_{16}}{T} + a_{17})(a_{18} - T)^{\frac{3}{2}}$$

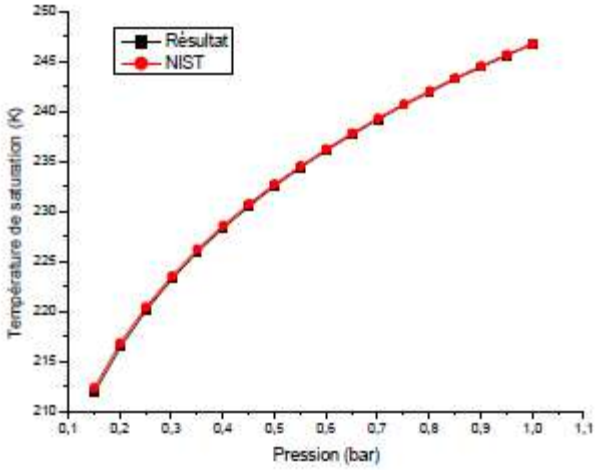
3-Les résultats :

*Variation de la température en fonction de la pression :

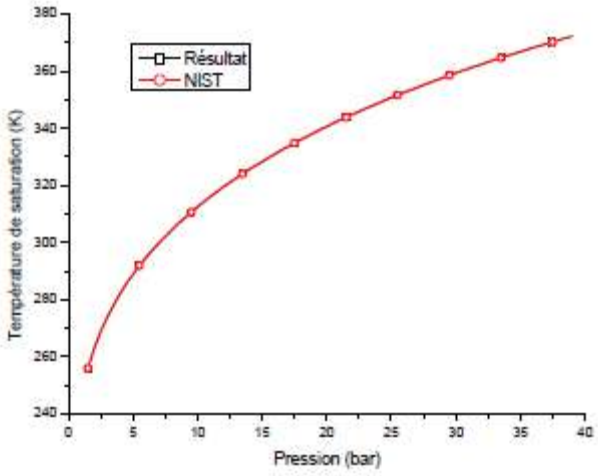
La méthode numérique des substitutions successives nous a permet de calculer les températures de saturation à partir de la pression de saturation, par inversion de l'expression de cette dernière, les résultats obtenus sont satisfaisants, permettant ainsi le calcul des autres paramètres thermodynamiques, quand-on ne dispose pas de la température au préalable.



P=0.011-0.101(pas=0.005)



P=0.151-1.001(pas=0.05)



P=1.501-39.001(pas=0.5)

4-Régulation :

La régulation est le moyen d'automatisme la marche d'une installation pour maintenir la température intérieure de la chambre froide stable.

Il existe plusieurs méthodes de régulation dans le domaine frigorifique :

4-1La régulation thermostatique :

Qui consiste à servir la marche du compresseur à un thermostat d'ambiance.

4-2La régulation pressostat :

Qui consiste à asservir la marche du compresseur à un pressostat basse pression.

4-3La régulation mixte :

Qui est aussi appeler PUMP-DOWN qui utilise pour la régulation de l'action combiné du pressostat basse pression et du thermostat d'ambiance.

Dans notre cas on a choisi la régulation mixte.

Le PUMP-DOWN est une régulation qui est aussi appeler le tirage à vide de l'évaporateur et il se réalise de la façon suivante :

- Une électrovanne montée sur la ligne liquide en amont du détendeur.

- Un thermostat d'ambiance placé dans l'enceinte à refroidir.
- Un pressostat basse pression raccordé au coté basse pression de l'installation au lus roche du compresseur.

4-4 Principe :

Lors de la température désiré est attente dans l'enceinte à refroidir, le thermostat coupe l'alimentation de l'électrovanne, ce qui interrompe l'arrivé du fluide frigorigène à l'état vapeur ; qui se trouve dans l'évaporateur, et quand la pression dans le circuit basse pression est suffisamment basse le pressostat basse pression coupe l'alimentation du groupe.

La température dans l'enceinte augmente, le thermostat s'enclenche, l'électrovanne s'ouvre et le fluide passe dans l'évaporateur ; la pression augmente dans l'évaporateur ainsi que dans le conduit d'aspiration et dés qu'elle attente sa valeur maximum le pressostat basse pression enclenche et excite la bobine du moteur électrique du compresseur et ce dernier démarre.

Avantage :

Pendant les périodes d'arrêt d'une installation frigorifique, il y a toujours migration du fluide frigorigène du point le plus chaud vers le point le plus froid du circuit, le fluide frigorigène a donc tendance à s'accumulé dans l'évaporateur et cela entraine un grand risque de coups liquide au démarrage de l'installation ; mais lors de l'utilisation du PUMP-DOWN comme régulation, on a la migration du fluide qui est bloqué par l'électrovanne.

Le PUMP-DOWN nous assure aussi le dégivrage automatique naturel et cyclique et cela grâce à l'action du pressostat basse pression.

L'action du pressostat basse pression nous assure aussi la protection contre le fonctionnement à vide de l'installation.

Conclusion :

D'une manière générale, les résultats obtenus sont satisfaisants. Cela grâce à l'efficacité des méthodes d'inversions utilisées comme la méthode de la sécante pour le calcul de la température à partir de la pression de saturation.

Dans la zone surchauffée, on retient les bons résultats qui ont été obtenus, concernant l'enthalpie massique de la vapeur surchauffée, cela conduira à un calcul minutieux des cycles frigorifiques, notamment ceux à compression de vapeur utilisant le R134a comme réfrigérant.

Conclusion générale :

Dans notre projet de fin d'étude intitulé optimisation des paramètres d'une chambre froide pour produit alimentaire on a évoqué dans le premier et le deuxième chapitres une généralité sur les principes de la thermodynamique avec quelques définitions sur le froid et en a fait une étude sur la chambre froide avec leurs catégories et son principes de fonctionnement.

Le froid est donc une utilité industrielle d'un grand intérêt notamment dans son utilisation dans les chambres froide en utilisant une technique d'une grande précision pour conserver des produits qui peuvent être périssable à fin de les consommer toute en gardant la qualité, la valeur nutritive et les paramètres gustative.

Et dans le troisième chapitre en a constaté que l'utilisation de chambres froides est très important dans la zone d'alimentation avec plusieurs types de refroidissement (réfrigération congélation et même surgélation) et que sont nécessaires pour maintenir la suivie des matériaux utilisable.
A la fin on a passé à certains modèles qui régissent le calcul des propriétés du R-134a, nous avons essayé d'implanter un certains nombre de ce modèle représentant des états thermodynamiques des fluides frigorigènes sur micro-ordinateur par le programme MATLAB, comme l'aide au dimensionnement des installations frigorifiques utile dans le milieu des spécialistes industriels du froid que dans celui de l'enseignement.

En perspective on recommande de poursuivre cette étude dans un aspect plus large et tout en prenons de nouveau paramètres qui influe sur la production du froid tels que d'autre paramètres et les produits différents..

Bibliographie :

[1] formulaire du froid, P.J, Patrick Jacquard (1999).

[2] produit laitier, Vermeer, la laitier, Amsterdam, de Rijksmuseum.

[3] la congélation et le stockage du fromage de chèvre. Le lait, PORTMAN (A) mars , avril (1970),

[4] le et le froid, Jacquet (J) et THEVENOT, éditions J.B Bailiere (1961).

[5] Application industrielles du froid, techniques de l'ingénieur, BE 9756.

[6] cours de froid à l'institut d'étude supérieures d'industries et d'économie laitiers, ANQUEZ (M) (1970).

[7] Mémoire de fin d'étude T s 33ème promotion intitulée « étude descriptive d'une centrale de l'eau glacée » (INSFP de Birr Mourad Rais)

[8] http://agora.qc.ca/mot.nsf/Dossier/lait. consulter le 15/02/2015.

[9] http://mendeleiev.cyberscol.qc.ca/carrefour/mousaique/99-00/pasteurisation consulter le 10/01/2015.

[10] http://www.fao.org/docrep/003/x6550f/X6550F02.htm #ch4112 consulter le 13/03/2015.

[11] ADEME, "le froid efficace dans l'industrie".

[12] LAURENT, 1974.

[13] CRAPLET, 1966.

[14] CARIP, 2008

[15] le vocabulaire de ‘’trépied frigorifique’’ de MONVOISIN

[16]FOSSE, 2003 ;

[17]El RAMMOUZ, 2008.

[18]LAURENT, 1974.

[19]BOURGEOIS, 1996.

[20] PFE de CFA de Médéa promotion 2013/2014 Mr.Benkenine.

Annexe :

1 PROPRIETES DU R134a [41]			
Propriété		Unité	Valeur
Masse molaire			102.03
Point d'ébullition	(1atm)	°C	-26.074
Point de solidification		°C	-103
Température critique		°C	101.03
Pression critique		Bar	40.56
Densité critique		Kg/m3	508
Pression de vapeur	(25°C)	Bar	6.652
Chaleur latente de vaporisation		kJ/kg	216.77
Densité de la vapeur saturée		kg/m3	5.229
Coefficient	(Liquide : 0 à 20°C)	1/°C	0.002766
Vitesse du son	(Liquide Sat. : 25°C)	m/s	503
Constante adiabatique	(Vapeur : 25°C/9 bar)		1.142
Facteur acentrique			0.327
Constante diélectrique	(Vapeur : 25°C/1atm)		1.014
Résistivité spécifique		Mohm.cm	180
Résistivité spécifique		Mohm.cm	66000
Pureté		%wt	99.98
Solubilité dans l'eau		%wt	0.0773

3 PRESSION DE SATURATION [28]

$$\ln p_{sat} = \sum_{i=1}^{4} a_i T^{i-2} + \left(\frac{a_{12}}{T} + a_{13}\right)\left(\ln(a_{14} - T)\right)$$

$a_1 = -3.9804 \cdot 10^{+03}$ $a_2 = +2.0198 \cdot 10^{+01}$ $a_3 = -2.4053 \cdot 10^{-02}$ $a_4 = +2.2452 \cdot 10^{-05}$	$a_{12} = +7.4803 \cdot 10^{+01}$ $a_{13} = -1.9955 \cdot 10^{-01}$ $a_{14} = +3.7485 \cdot 10^{+02}$	T = Température en K p_{sat} en bar

3bis PRESSION DE SATURATION (EQUATION D'ANTOINE) [41]

$$\ln p_{sat} = A + \frac{B}{C + T} + D \cdot T + E \ln(T)$$

$A = +102.5338784$ $B = -5238.8786$ $C = 0$ $D = +0.02398227$ $E = -15.8343842$	T = température en K p_{sat} = pression de vapeur en bar

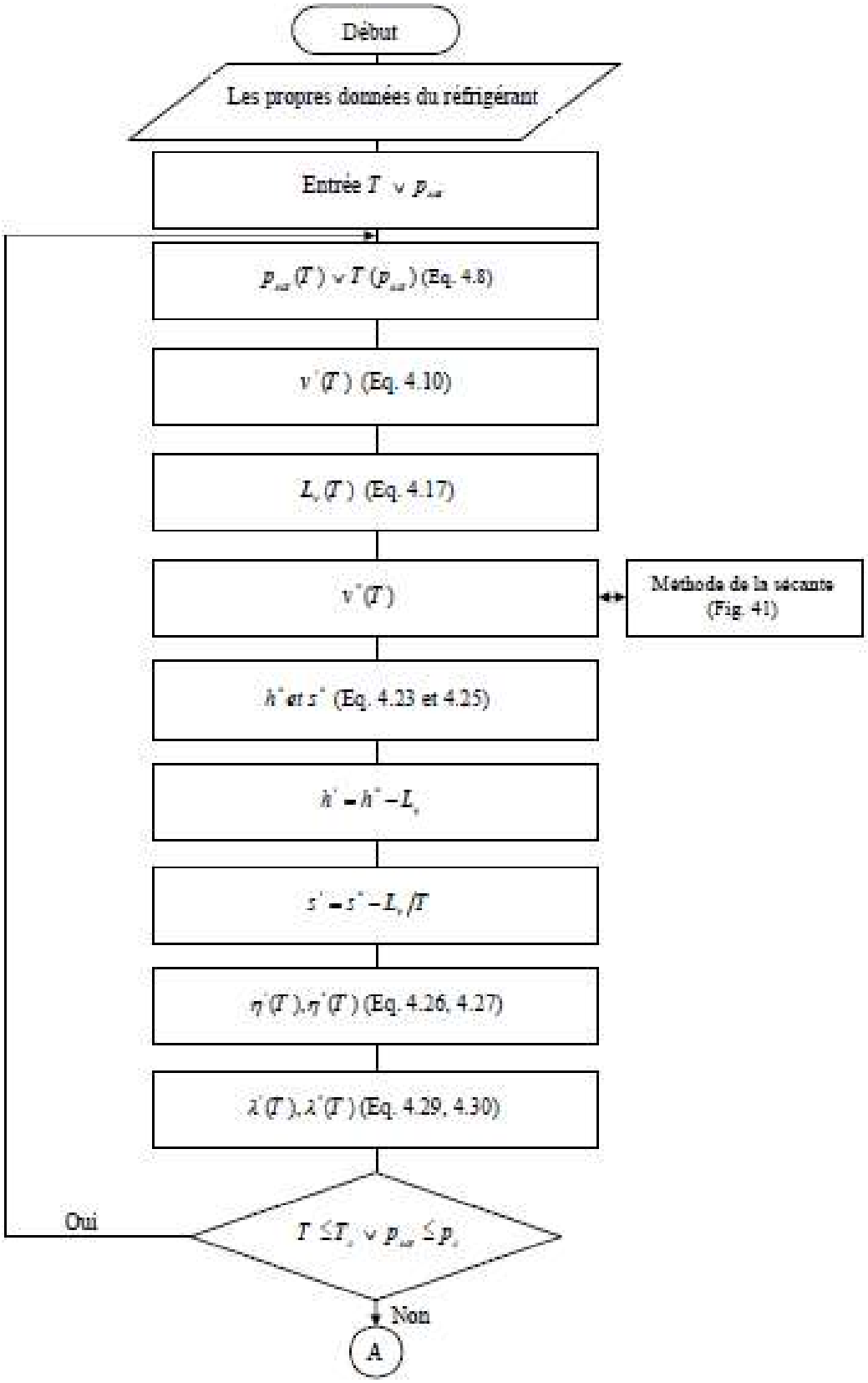
Table de saturation où la température donnée varie de 173,15 à 373,15.

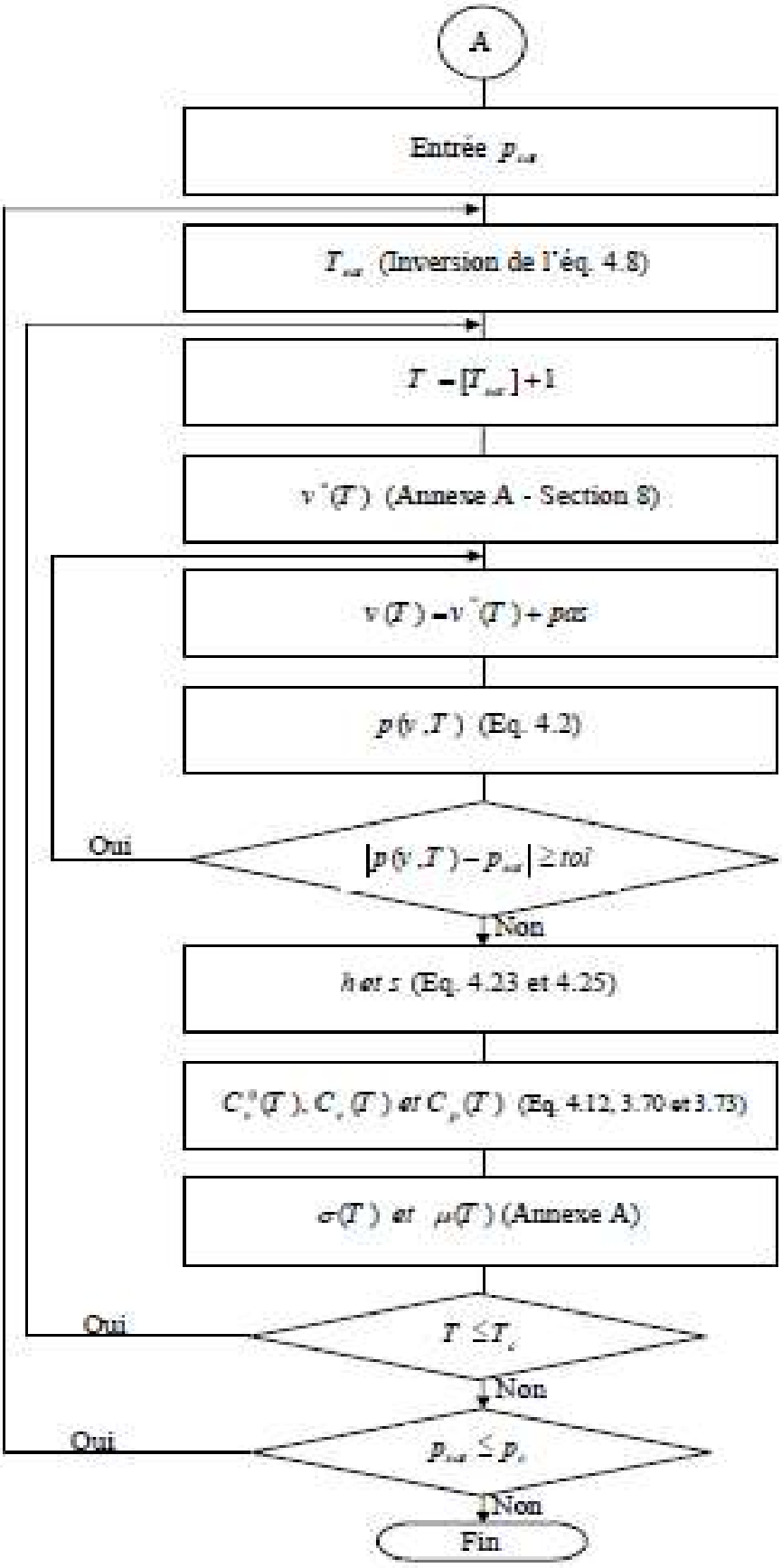
T	P	v'	v''	h'	L_v	h''	s'	s''
173,15	0,0064	6,3404E-4	21,7754	76,4340	258,3489	334,7828	0,5040	1,9961
174,15	0,0071	6,3507E-4	21,7755	77,4690	257,8470	335,3161	0,5125	1,9931
175,15	0,0079	6,3611E-4	18,2861	78,5236	257,3438	335,8674	0,5208	1,9901
176,15	0,0087	6,3714E-4	18,2862	79,5652	256,8392	336,4043	0,5291	1,9871
177,15	0,0096	6,3819E-4	15,2100	80,6189	256,3331	336,9520	0,5372	1,9842
178,15	0,0105	6,3924E-4	13,7758	81,6688	255,8257	337,4945	0,5452	1,9812
179,15	0,0116	6,4029E-4	12,5885	82,7202	255,3168	338,0370	0,5531	1,9783
180,15	0,0127	6,4135E-4	11,5209	83,7736	254,8064	338,5801	0,5610	1,9754
181,15	0,0140	6,4241E-4	10,5557	84,8292	254,2946	339,1238	0,5687	1,9725
182,15	0,0153	6,4348E-4	9,6820	85,8870	253,7813	339,6683	0,5763	1,9696
183,15	0,0168	6,4455E-4	8,8900	86,9474	253,2665	340,2139	0,5838	1,9667
184,15	0,0183	6,4563E-4	8,1715	88,0103	252,7502	340,7605	0,5913	1,9638
185,15	0,0200	6,4672E-4	7,5189	89,0760	252,2324	341,3084	0,5986	1,9609
186,15	0,0218	6,4781E-4	6,9257	90,1445	251,7130	341,8575	0,6058	1,9580
187,15	0,0238	6,4890E-4	6,3855	91,2160	251,1920	342,4080	0,6130	1,9552
188,15	0,0259	6,5000E-4	5,8935	92,2905	250,6695	342,9600	0,6200	1,9523
189,15	0,0282	6,5111E-4	5,4448	93,3681	250,1454	343,5135	0,6270	1,9494
190,15	0,0306	6,5222E-4	5,0349	94,4489	249,6196	344,0685	0,6338	1,9466
191,15	0,0333	6,5334E-4	4,6603	95,5330	249,0922	344,6252	0,6406	1,9437
192,15	0,0361	6,5447E-4	4,3176	96,6204	248,5632	345,1836	0,6473	1,9409
193,15	0,0391	6,5559E-4	4,0037	97,7112	248,0325	345,7437	0,6539	1,9381
194,15	0,0423	6,5673E-4	3,7159	98,8054	247,5001	346,3056	0,6604	1,9352
195,15	0,0458	6,5787E-4	3,4518	99,9031	246,9661	346,8692	0,6669	1,9324
196,15	0,0495	6,5902E-4	3,2093	101,0044	246,4302	347,4347	0,6732	1,9296
197,15	0,0534	6,6017E-4	2,9864	102,1093	245,8927	348,0020	0,6795	1,9268
198,15	0,0576	6,6133E-4	2,7813	103,2177	245,3534	348,5711	0,6857	1,9239
199,15	0,0621	6,6250E-4	2,5923	104,3299	244,8123	349,1422	0,6918	1,9211
200,15	0,0669	6,6367E-4	2,4182	105,4457	244,2694	349,7152	0,6979	1,9183
201,15	0,0720	6,6485E-4	2,2576	106,5653	243,7247	350,2901	0,7039	1,9155
202,15	0,0774	6,6604E-4	2,1093	107,6887	243,1782	350,8669	0,7098	1,9127
203,15	0,0831	6,6723E-4	1,9722	108,8159	242,6297	351,4457	0,7156	1,9099
204,15	0,0892	6,6843E-4	1,8454	109,9470	242,0795	352,0264	0,7213	1,9071
205,15	0,0957	6,6963E-4	1,7281	111,0819	241,5273	352,6092	0,7270	1,9044
206,15	0,1026	6,7084E-4	1,6194	112,2207	240,9731	353,1939	0,7326	1,9016
207,15	0,1098	6,7206E-4	1,5186	113,3635	240,4171	353,7806	0,7382	1,8988
208,15	0,1175	6,7329E-4	1,4251	114,5103	239,8590	354,3693	0,7437	1,8960
209,15	0,1257	6,7452E-4	1,3383	115,6610	239,2990	354,9600	0,7491	1,8932
210,15	0,1343	6,7576E-4	1,2576	116,8158	238,7369	355,5527	0,7544	1,8905
211,15	0,1434	6,7701E-4	1,1826	117,9747	238,1728	356,1475	0,7597	1,8877
212,15	0,1530	6,7826E-4	1,1128	119,1376	237,6066	356,7443	0,7649	1,8849
213,15	0,1632	6,7952E-4	1,0478	120,3047	237,0384	357,3431	0,7701	1,8822
214,15	0,1738	6,8079E-4	0,9872	121,4759	236,4680	357,9439	0,7752	1,8794
215,15	0,1851	6,8207E-4	0,9307	122,6512	235,8955	358,5468	0,7802	1,8766
216,15	0,1970	6,8335E-4	0,8780	123,8308	235,3209	359,1517	0,7852	1,8739
217,15	0,2095	6,8465E-4	0,8287	125,0146	234,7440	359,7587	0,7901	1,8711
218,15	0,2226	6,8595E-4	0,7827	126,2027	234,1649	360,3677	0,7950	1,8684
219,15	0,2364	6,8725E-4	0,7397	127,3951	233,5836	360,9787	0,7998	1,8656
220,15	0,2509	6,8857E-4	0,6995	128,5918	233,0000	361,5918	0,8045	1,8629
221,15	0,2662	6,8989E-4	0,6618	129,7928	232,4141	362,2069	0,8092	1,8602
222,15	0,2822	6,9123E-4	0,6265	130,9982	231,8259	362,8241	0,8139	1,8574
223,15	0,2990	6,9257E-4	0,5934	132,2080	231,2353	363,4434	0,8185	1,8547
224,15	0,3165	6,9392E-4	0,5624	133,4223	230,6424	364,0646	0,8230	1,8520
225,15	0,3350	6,9528E-4	0,5332	134,6410	230,0470	364,6880	0,8275	1,8492
226,15	0,3543	6,9664E-4	0,5059	135,8642	229,4492	365,3134	0,8319	1,8465
227,15	0,3745	6,9802E-4	0,4801	137,0919	228,8489	365,9408	0,8363	1,8438
228,15	0,3956	6,9940E-4	0,4559	138,3242	228,2461	366,5703	0,8406	1,8411
229,15	0,4177	7,0080E-4	0,4332	139,5611	227,6407	367,2018	0,8449	1,8383
230,15	0,4408	7,0220E-4	0,4118	140,8026	227,0328	367,8354	0,8492	1,8356
231,15	0,4649	7,0361E-4	0,3917	142,0488	226,4222	368,4710	0,8534	1,8329

232,15	0,4901	7,0503E-4	0,3727	143,2996	225,8091	369,1087	0,8575	1,8302
233,15	0,5164	7,0647E-4	0,3548	144,5552	225,1932	369,7485	0,8616	1,8275
234,15	0,5438	7,0791E-4	0,3379	145,8156	224,5747	370,3903	0,8657	1,8248
235,15	0,5723	7,0936E-4	0,3220	147,0807	223,9534	371,0341	0,8697	1,8221
236,15	0,6021	7,1082E-4	0,3069	148,3506	223,3293	371,6800	0,8737	1,8194
237,15	0,6331	7,1228E-4	0,2927	149,6254	222,7024	372,3279	0,8776	1,8167
238,15	0,6654	7,1377E-4	0,2793	150,9052	222,0727	372,9778	0,8815	1,8140
239,15	0,6990	7,1527E-4	0,2666	152,1898	221,4400	373,6298	0,8854	1,8113
240,15	0,7340	7,1677E-4	0,2545	153,4794	220,8044	374,2839	0,8892	1,8086
241,15	0,7703	7,1828E-4	0,2432	154,7741	220,1659	374,9400	0,8930	1,8059
242,15	0,8081	7,1981E-4	0,2324	156,0738	219,5243	375,5981	0,8967	1,8033
243,15	0,8473	7,2134E-4	0,2222	157,3785	218,8797	376,2582	0,9004	1,8006
244,15	0,8881	7,2289E-4	0,2125	158,6885	218,2320	376,9204	0,9041	1,7979
245,15	0,9304	7,2445E-4	0,2033	160,0035	217,5811	377,5846	0,9077	1,7952
246,15	0,9743	7,2602E-4	0,1946	161,3239	216,9270	378,2509	0,9113	1,7925
247,15	1,0198	7,2760E-4	0,1863	162,6494	216,2697	378,9192	0,9148	1,7899
248,15	1,0670	7,2920E-4	0,1785	163,9803	215,6092	379,5895	0,9183	1,7872
249,15	1,1159	7,3081E-4	0,1710	165,3165	214,9453	380,2618	0,9218	1,7845
250,15	1,1666	7,3243E-4	0,1639	166,6581	214,2780	380,9362	0,9253	1,7819
251,15	1,2191	7,3406E-4	0,1572	168,0052	213,6074	381,6125	0,9287	1,7792
252,15	1,2735	7,3570E-4	0,1508	169,3577	212,9332	382,2909	0,9321	1,7765
253,15	1,3297	7,3736E-4	0,1447	170,7159	212,2555	382,9714	0,9354	1,7739
254,15	1,3880	7,3903E-4	0,1389	172,0795	211,5742	383,6538	0,9388	1,7712
255,15	1,4481	7,4072E-4	0,1333	173,4489	210,8894	384,3382	0,9420	1,7686
256,15	1,5104	7,4242E-4	0,1281	174,8239	210,2008	385,0247	0,9453	1,7659
257,15	1,5747	7,4413E-4	0,1231	176,2047	209,5085	385,7132	0,9485	1,7633
258,15	1,6412	7,4586E-4	0,1183	177,5912	208,8124	386,4036	0,9518	1,7606
259,15	1,7098	7,4760E-4	0,1137	178,9837	208,1124	387,0961	0,9549	1,7580
260,15	1,7807	7,4936E-4	0,1093	180,3820	207,4086	387,7906	0,9581	1,7553
261,15	1,8538	7,5113E-4	0,1052	181,7864	206,7007	388,4871	0,9612	1,7527
262,15	1,9293	7,5292E-4	0,1012	183,1967	205,9888	389,1855	0,9643	1,7501
263,15	2,0071	7,5472E-4	0,0974	184,6132	205,2728	389,8860	0,9674	1,7474
264,15	2,0874	7,5654E-4	0,0938	186,0358	204,5527	390,5885	0,9704	1,7448
265,15	2,1702	7,5837E-4	0,0903	187,4647	203,8283	391,2929	0,9734	1,7422
266,15	2,2555	7,6022E-4	0,0870	188,8998	203,0996	391,9994	0,9764	1,7395
267,15	2,3434	7,6209E-4	0,0838	190,3413	202,3665	392,7078	0,9794	1,7369
268,15	2,4339	7,6398E-4	0,0808	191,7892	201,6290	393,4182	0,9824	1,7343
269,15	2,5271	7,6588E-4	0,0779	193,2437	200,8870	394,1306	0,9853	1,7317
270,15	2,6231	7,6780E-4	0,0751	194,7047	200,1404	394,8450	0,9882	1,7291
271,15	2,7218	7,6974E-4	0,0725	196,1723	199,3891	395,5614	0,9911	1,7264
272,15	2,8234	7,7169E-4	0,0699	197,6467	198,6330	396,2797	0,9940	1,7238
273,15	2,9280	7,7367E-4	0,0675	199,1278	197,8722	397,0000	0,9968	1,7212
274,15	3,0354	7,7567E-4	0,0651	200,6159	197,1063	397,7223	0,9996	1,7186
275,15	3,1459	7,7768E-4	0,0629	202,1109	196,3356	398,4465	1,0024	1,7160
276,15	3,2595	7,7972E-4	0,0607	203,6130	195,5597	399,1727	1,0052	1,7134
277,15	3,3762	7,8177E-4	0,0586	205,1222	194,7786	399,9009	1,0080	1,7108
278,15	3,4960	7,8385E-4	0,0566	206,6387	193,9923	400,6310	1,0108	1,7082
279,15	3,6191	7,8595E-4	0,0547	208,1625	193,2006	401,3630	1,0135	1,7056
280,15	3,7455	7,8806E-4	0,0529	209,6937	192,4034	402,0971	1,0162	1,7030
281,15	3,8753	7,9021E-4	0,0511	211,2324	191,6007	402,8330	1,0189	1,7004
282,15	4,0085	7,9237E-4	0,0494	212,7787	190,7923	403,5710	1,0216	1,6978
283,15	4,1451	7,9456E-4	0,0478	214,3327	189,9781	404,3108	1,0243	1,6952
284,15	4,2853	7,9677E-4	0,0463	215,8946	189,1581	405,0526	1,0269	1,6926
285,15	4,4290	7,9901E-4	0,0447	217,4644	188,3320	405,7964	1,0296	1,6900
286,15	4,5765	8,0127E-4	0,0433	219,0423	187,4998	406,5421	1,0322	1,6875
287,15	4,7276	8,0355E-4	0,0419	220,6283	186,6614	407,2897	1,0348	1,6849
288,15	4,8825	8,0586E-4	0,0406	222,2226	185,8167	408,0392	1,0374	1,6823
289,15	5,0412	8,0820E-4	0,0393	223,8253	184,9654	408,7907	1,0400	1,6797
290,15	5,2038	8,1057E-4	0,0380	225,4366	184,1076	409,5441	1,0426	1,6771
291,15	5,3703	8,1296E-4	0,0368	227,0565	183,2430	410,2994	1,0452	1,6746
292,15	5,5409	8,1539E-4	0,0357	228,6852	182,3715	411,0567	1,0478	1,6720
293,15	5,7155	8,1784E-4	0,0345	230,3229	181,4930	411,8158	1,0503	1,6694

294,15	5,8943	8,2032E-4	0,0335	231,9696	180,6073	412,5769	1,0329	1,6669
295,15	6,0773	8,2283E-4	0,0324	233,6256	179,7143	413,3399	1,0354	1,6643
296,15	6,2645	8,2538E-4	0,0314	235,2910	178,8138	414,1048	1,0379	1,6617
297,15	6,4561	8,2795E-4	0,0305	236,9660	177,9056	414,8716	1,0405	1,6592
298,15	6,6520	8,3056E-4	0,0295	238,6506	176,9896	415,6402	1,0430	1,6566
299,15	6,8524	8,3321E-4	0,0286	240,3452	176,0657	416,4108	1,0455	1,6541
300,15	7,0573	8,3589E-4	0,0278	242,0498	175,1335	417,1833	1,0480	1,6515
301,15	7,2669	8,3860E-4	0,0269	243,7646	174,1931	417,9577	1,0505	1,6490
302,15	7,4810	8,4136E-4	0,0261	245,4899	173,2440	418,7339	1,0530	1,6464
303,15	7,6999	8,4415E-4	0,0253	247,2259	172,2862	419,5121	1,0555	1,6439
304,15	7,9236	8,4698E-4	0,0246	248,9726	171,3195	420,2921	1,0781	1,6413
305,15	8,1521	8,4985E-4	0,0238	250,7305	170,3435	421,0740	1,0806	1,6388
306,15	8,3855	8,5276E-4	0,0231	252,4995	169,3582	421,8578	1,0831	1,6362
307,15	8,6240	8,5572E-4	0,0224	254,2801	168,3633	422,6434	1,0856	1,6337
308,15	8,8674	8,5872E-4	0,0218	256,0725	167,3584	423,4309	1,0881	1,6312
309,15	9,1161	8,6176E-4	0,0211	257,8768	166,3435	424,2203	1,0906	1,6286
310,15	9,3699	8,6485E-4	0,0205	259,6933	165,3182	425,0115	1,0931	1,6261
311,15	9,6289	8,6799E-4	0,0199	261,5224	164,2822	425,8046	1,0956	1,6236
312,15	9,8933	8,7118E-4	0,0193	263,3643	163,2353	426,5996	1,0981	1,6210
313,15	10,1632	8,7442E-4	0,0187	265,2192	162,1772	427,3963	1,1006	1,6185
314,15	10,4385	8,7772E-4	0,0182	267,0875	161,1075	428,1950	1,1032	1,6160
315,15	10,7193	8,8107E-4	0,0177	268,9695	160,0260	428,9955	1,1057	1,6135
316,15	11,0058	8,8447E-4	0,0171	270,8655	158,9322	429,7978	1,1082	1,6110
317,15	11,2980	8,8794E-4	0,0166	272,7759	157,8260	430,6019	1,1108	1,6084
318,15	11,5959	8,9147E-4	0,0161	274,7011	156,7069	431,4079	1,1134	1,6059
319,15	11,8998	8,9505E-4	0,0157	276,6413	155,5744	432,2157	1,1159	1,6034
320,15	12,2095	8,9871E-4	0,0152	278,5971	154,4283	433,0254	1,1185	1,6009
321,15	12,5252	9,0243E-4	0,0148	280,5688	153,2681	433,8368	1,1211	1,5984
322,15	12,8471	9,0623E-4	0,0143	282,5568	152,0933	434,6501	1,1238	1,5959
323,15	13,1751	9,1009E-4	0,0139	284,5617	150,9035	435,4652	1,1264	1,5934
324,15	13,5093	9,1404E-4	0,0135	286,5838	149,6982	436,2821	1,1291	1,5909
325,15	13,8499	9,1806E-4	0,0131	288,6238	148,4770	437,1007	1,1317	1,5884
326,15	14,1968	9,2216E-4	0,0127	290,6821	147,2391	437,9212	1,1344	1,5859
327,15	14,5503	9,2635E-4	0,0123	292,7593	145,9842	438,7435	1,1372	1,5834
328,15	14,9103	9,3063E-4	0,0120	294,8560	144,7115	439,5676	1,1399	1,5809
329,15	15,2770	9,3501E-4	0,0116	296,9728	143,4206	440,3934	1,1427	1,5784
330,15	15,6504	9,3948E-4	0,0113	299,1105	142,1105	441,2210	1,1455	1,5759
331,15	16,0306	9,4405E-4	0,0109	301,2696	140,7808	442,0504	1,1483	1,5734
332,15	16,4178	9,4873E-4	0,0106	303,4510	139,4306	442,8815	1,1512	1,5709
333,15	16,8120	9,5352E-4	0,0103	305,6554	138,0591	443,7145	1,1541	1,5685
334,15	17,2133	9,5843E-4	0,0099	307,8837	136,6654	444,5491	1,1570	1,5660
335,15	17,6217	9,6347E-4	0,0096	310,1368	135,2487	445,3855	1,1600	1,5635
336,15	18,0375	9,6863E-4	0,0093	312,4156	133,8080	446,2237	1,1630	1,5610
337,15	18,4606	9,7393E-4	0,0090	314,7212	132,3423	447,0635	1,1660	1,5586
338,15	18,8913	9,7937E-4	0,0087	317,0547	130,8504	447,9051	1,1691	1,5561
339,15	19,3295	9,8497E-4	0,0084	319,4173	129,3311	448,7484	1,1723	1,5536
340,15	19,7753	9,9073E-4	0,0082	321,8102	127,7832	449,5934	1,1755	1,5512
341,15	20,2290	9,9665E-4	0,0079	324,2348	126,2053	450,4401	1,1788	1,5487
342,15	20,6906	0,0010	0,0076	326,6925	124,5958	451,2884	1,1821	1,5462
343,15	21,1601	0,0010	0,0020	329,0716	122,9533	452,0248	1,1867	1,5450
344,15	21,6378	0,0010	0,0020	331,6043	121,2758	452,8801	1,1901	1,5425
345,15	22,1237	0,0010	0,0020	334,1736	119,5616	453,7372	1,1936	1,5400
346,15	22,6180	0,0010	0,0020	336,7876	117,8085	454,5961	1,1972	1,5375
347,15	23,1207	0,0010	0,0020	339,4426	116,0142	455,4569	1,2008	1,5350
348,15	23,6320	0,0010	0,0021	342,1431	114,1763	456,3194	1,2046	1,5325
349,15	24,1520	0,0011	0,0021	344,8919	112,2919	457,1838	1,2084	1,5300
350,15	24,6808	0,0011	0,0021	347,6919	110,3581	458,0500	1,2124	1,5276
351,15	25,2187	0,0011	0,0021	350,5467	108,3713	458,9181	1,2165	1,5251
352,15	25,7656	0,0011	0,0022	353,4600	106,3279	459,7879	1,2207	1,5226
353,15	26,3218	0,0011	0,0022	356,4361	104,2235	460,6596	1,2250	1,5201
354,15	26,8875	0,0011	0,0022	359,4798	102,0533	461,5330	1,2295	1,5176
355,15	27,4627	0,0011	0,0022	362,5965	99,8118	462,4083	1,2341	1,5152

356,15	28,0477	0,0011	0,0023	365,7925	97,4928	463,2853	1,2390	1,5127
357,15	28,6426	0,0011	0,0023	369,0751	95,0891	464,1642	1,2440	1,5102
358,15	29,2476	0,0011	0,0023	372,4525	92,5922	465,0448	1,2492	1,5078
359,15	29,8630	0,0012	0,0023	375,9347	89,9925	463,9271	1,2547	1,5053
360,15	30,4888	0,0012	0,0024	379,5332	87,2781	466,8113	1,2605	1,5028
361,15	31,1254	0,0012	0,0024	383,2619	84,4351	467,6971	1,2666	1,5004
362,15	31,7730	0,0012	0,0024	387,1380	81,4466	468,5846	1,2730	1,4979
363,15	32,4318	0,0012	0,0024	391,1825	78,2913	469,4738	1,2799	1,4955
364,15	33,1022	0,0012	0,0024	395,4220	74,9427	470,3647	1,2872	1,4930
365,15	33,7845	0,0013	0,0024	399,8909	71,3663	471,2572	1,2951	1,4906
366,15	34,4791	0,0013	0,0025	404,6351	67,5163	472,1514	1,3037	1,4881
367,15	35,1863	0,0013	0,0025	409,7180	63,3292	473,0472	1,3132	1,4857
368,15	35,9068	0,0013	0,0025	415,2317	58,7130	473,9447	1,3238	1,4832
369,15	36,6411	0,0014	0,0025	421,3188	53,5250	474,8438	1,3358	1,4808
370,15	37,3900	0,0014	0,0025	428,2226	47,5219	475,7445	1,3500	1,4784
371,15	38,1547	0,0015	0,0025	436,4260	40,2209	476,6469	1,3676	1,4760
372,15	38,9366	0,0016	0,0024	447,2136	30,3373	477,5509	1,3920	1,4735
373,15	39,7385	0,0020	0,0024	478,4566	-	478,4566	1,4711	1,4711


Début
Les propres données du réfrigérant
Entrée T ∨ p_{sat}
$p_{sat}(T)$ ∨ $T(p_{sat})$ (Eq. 4.8)
$v'(T)$ (Eq. 4.10)
$L_v(T)$ (Eq. 4.17)
$v^*(T)$
Méthode de la sécante (Fig. 41)
h^* et s^* (Eq. 4.23 et 4.25)
$h' = h^* - L_v$
$s' = s^* - L_v/T$
$\eta'(T), \eta^*(T)$ (Eq. 4.26, 4.27)
$\lambda'(T), \lambda^*(T)$ (Eq. 4.29, 4.30)
$T \leq T_c$ ∨ $p_{sat} \leq p_c$
Oui
Non
A


A
Entrée p_{sat}
T_{sat} (Inversion de l'éq. 4.8)
$T = [T_{sat}] + 1$
$v^*(T)$ (Annexe A - Section 8)
$v(T) = v^*(T) + pas$
$p(v, T)$ (Eq. 4.2)
Oui
$|p(v, T) - p_{sat}| \geq tol$
Non
h et s (Eq. 4.23 et 4.25)
$C_v^*(T)$, $C_v(T)$ et $C_p(T)$ (Eq. 4.12, 3.70 et 3.73)
$\sigma(T)$ et $\mu(T)$ (Annexe A)
Oui
$T \leq T_c$
Non
Oui
$p_{sat} \leq p_c$
Non
Fin