

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : INSTALLATIONS ÉNERGÉTIQUES ET TURBOMACHINES

Par :

BENCHILLA Tahar

BENDAHMANE Massinissa

Thème

Etude d'une machine frigorifique négative

Ifri -akbou

Soutenu le 28/09/2022

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Université | |
|---------------------------------|--------------|-----------------------------|------------------|
| Mr.BENSLIMANE Abdelhakim | MCA | Université de Bejaia | Président |
| Mr.DJERRADA Abderrahmane | MCB | Université de Bejaia | Examineur |
| Mr.SADAOUI Djamel | MCA | Université de Bejaia | Encadrant |

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Nous tenons en tout premier lieu à remercier notre encadreur Mr. Djerrada. A pour la qualité de son encadrement, pour sa patience, sa disponibilité ainsi que sa rigueur.

Nous remercions également tous les membres du personnels Ifri pour leur accueil leur orientation ainsi que pour l'aide qu'ils nous ont prodigué durant la durée de notre stage au sein de l'entreprise.

Nous tenons également à adresser nos remerciements aux membres du jury ainsi qu'au président du jury Mr. Sadaoui pour avoir accepté de prendre de leurs temps pour examiner et évaluer notre travail.

Et enfin nous remercions tous nos professeurs du département Génie mécanique pour leurs enseignements, sans oublier toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



B.Tahar & B.Massinissa -

Dédicace

A nos chers parents

*Quoi que nous fassions nous ne serons jamais assez-vous
remercier pour votre affection et votre soutien
inconditionnel vous êtes nos guides et la source de notre
force qui nous aide à nous affranchir de tous les obstacles.*

A nos chers frères et sœurs

A tous nos amis

*Puisse dieu vous donner santé, bonheur, courage et
réussite*



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné à la vie,
qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite,*

A ma mère...

*A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les
années des études, qui a veillé à me donner l'aide,
A m'encourager et à me protéger, que dieu les gardes et
les protèges.*

A mon adorable sœur et mes frères

A ma très chère nièce

A tout ma famille

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que j'aime



B.Massinissa -

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dedicace

Sommaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction generale..... 1

Chapitre I

Presentation de l'entreprise sarl ibrahim & fils

| | |
|--|---|
| I.1. Présentation de l'entreprise Ifri | 4 |
| I.1.1. Histoire de l'entreprise | 4 |
| I.2. Missions et objectifs de l'entreprise..... | 4 |
| I.2.1. Missions | 4 |
| I.2.2. Objectifs | 5 |
| I.2.3. Fiche signalétique..... | 5 |
| I.2.4. Concurrents de l'entreprise Ifri | 5 |
| I.3. Organisation de l'entreprise Ifri | 5 |
| I.3.1. Direction générale | 6 |
| I.3.2. Division administrative et financière | 6 |
| I.3.3. Division commerciale et marketing | 6 |
| I.3.4. Division industrielle | 7 |
| I.3.5. Division supply chain..... | 7 |

Chapitre II

Generalites sur le froid

| | |
|---|----|
| II.1. La production du froid | 9 |
| II.2. Historique..... | 9 |
| II.3. Domaines d'utilisation du froid | 10 |
| II.4. Les machines frigorifiques..... | 10 |
| II.5. Les différents éléments d'une installation frigorifique | 11 |
| II.5.1. Compresseur | 11 |
| II.5.1.1. Compresseur à piston..... | 11 |
| II.5.1.2. Compresseur scroll | 12 |
| II.5.1.3. Compresseur à vis | 12 |
| II.5.2. Condenseur | 14 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| II.5.2.1. Condenseurs à air | 15 |
| II.5.2.2. Condenseurs à eau..... | 15 |
| II.5.3. Détendeur | 15 |
| II.5.3.1. Détendeur capillaire | 15 |
| II.5.3.2. Détendeur thermostatique | 16 |
| II.5.3.3. Détendeur électronique | 16 |
| II.5.4. Evaporateur | 17 |
| II.6. Fonctionnement d'une installation frigorifique | 18 |
| II.7. Différents types d'installations frigorifiques | 18 |
| II.7.1. Installation frigorifique a compression | 18 |
| II.7.2. Installation frigorifique a gaz froid | 19 |
| II.7.3. Installation frigorifique a absorption | 20 |
| II.7.4. Installation frigorifique thermoélectrique | 21 |
| II.7.5. Générateur de froid a vortex | 22 |
| II.8. Isolation des chambres froides | 23 |
| II.8.1. Types d'isolants | 23 |

Chapitre III

Les fluides frigorigènes

| | |
|--|----|
| III.1. Fluides frigorigènes | 26 |
| III.2. Nomenclature et propriétés de certains fluides frigorigènes | 26 |
| III.2.1. Nomenclature des fluides frigorigènes | 26 |
| III.2.2. Propriétés de quelques fluides frigorigènes..... | 27 |
| III.3. Les différents fluides frigorigènes | 28 |
| III.3.1. Fluides naturels (série des 700) | 28 |
| III.3.2. Fluides hydrocarbures (série des 600)..... | 29 |
| III.3.3. Les hydrocarbures halogénés (série 400 et 500) | 29 |
| III.3.3.1. Les hydrofluorocarbures (HFC) | 29 |
| III.3.3.2. Les chlorofluorocarbures (CFC)..... | 30 |
| III.3.3.3. Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) | 30 |
| III.3.3.4. Les hydrofluorooléfines (HFO) | 30 |
| III.3.4. Les azéotropes | 30 |
| III.3.5. Les zéotropes | 30 |
| III.4. L'impact sur l'environnement | 31 |
| III.4.1. ODP (Potentiel de destruction de l'ozone)..... | 32 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| III.4.2. GWP (Potentiel de réchauffement global)..... | 33 |
| III.4.3. TEWI (Impact de réchauffement total équivalent) :..... | 33 |
| III.5. Les qualités d'un bon fluide frigorigène | 33 |

Chapitre IV

Bilan thermique

| | |
|--|----|
| Introduction | 37 |
| IV.1. Charge thermique de la chambre froide | 37 |
| IV.1.1. Charge thermique externe | 37 |
| IV.1.2. Charge thermique interne | 39 |
| IV.1.3. Somme des charges thermiques de la chambre froide | 42 |
| IV.1.4. Charge thermique non chiffrable..... | 42 |
| IV.1.5. Charge thermique global de la chambre froide | 42 |
| IV.1.6. Puissance frigorifique..... | 42 |
| IV.2. Calcul des charges thermiques | 43 |
| IV.2.1. Calcul pour la chambre froide à température de -15°C | 43 |
| IV.2.1.1. Données de calculs | 43 |
| IV.2.1.2. Calcul des charges thermiques externes | 43 |
| IV.2.1.3. Calcul des charges thermiques internes..... | 47 |
| IV.2.2. Somme des charges thermiques de la chambre froide | 49 |
| IV.2.3. Charge thermique non chiffrable..... | 49 |
| IV.2.4. Charge totale..... | 49 |
| IV.2.5. Calcul de la puissance frigorifique correspondante..... | 49 |
| Conclusions | 49 |

Chapitre V

Analyse thermodynamique

| | |
|--|----|
| Introduction | 51 |
| V.1. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R404a | 51 |
| V.1.1. Présentation de l'installation | 51 |
| V.1.2. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique | 52 |
| V.1.3. Régime de fonctionnement | 52 |
| V.1.4. Calcul des différents points du cycle | 53 |
| V.1.5. Etude énergétique de l'installation frigorifique..... | 55 |
| V.2. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R134a | 57 |
| V.2.1. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique | 57 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| V.2.2. Régime de fonctionnement | 57 |
| V.2.3. Calcul des différents points du cycle | 57 |
| V.2.4. Etude énergétique de l'installation frigorifique | 59 |
| V.3. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R134a | 61 |
| V.3.1. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique | 61 |
| V.3.2. Régime de fonctionnement | 61 |
| V.3.3. Calcul des différents points du cycle | 61 |
| V.3.4. Etude énergétique de l'installation frigorifique | 63 |
| V.4. Comparaison entre le R404A, le R717 et le R134a | 65 |
| Conclusion generale..... | 66 |
| References bibliographiques..... | 68 |
| Annexes..... | 71 |

Nomenclature

Nomenclature

| | |
|---|-------------------------|
| $\sum \frac{e}{\lambda}$: Somme des résistances thermiques des différentes couches des matériaux constituant la paroi. | / |
| C_a : capacité thermique massique des denrées | [kJ/kg. °C] |
| COP : coefficient de performance | / |
| e : épaisseur de la paroi d'isolant | [m] |
| h_e : Coefficient de transfert de chaleur par convection extérieur | [W/m ² .°C] |
| h_e^s : l'enthalpie de l'air extérieur | [kJ/kg d'air sec] |
| h_i : Coefficient de transfert de chaleur par convection intérieur | [W/m ² .°C] |
| h_i^s : l'enthalpie de l'air intérieur | [kJ/kg d'air sec] |
| K : coefficient de transmission thermique | [W/m ² . °C] |
| m_a : masse d'air entrante | [kg d'air sec] |
| m_d : La masse des denrées introduites dans la chambre pajour | [kg] |
| n : Nombre de matériel roulant d'un type donné | / |
| $n_{éc}$: Nombre d'éclairage | / |
| n_{per} : Nombre de personne | / |
| n_r : nombre de renouvellement d'air | / |
| n_v : Nombre des moteurs de ventilateur, | / |
| P : La puissance | [W] |
| P : Puissance de chaque type de matériel | [W] |
| P_c : puissance compresseur | [kw] |
| P_{cd} : puissance condenseur | [kw] |
| P_{ev} : puissance évaporateur | [kw] |
| p_v : Puissance absorbée par les moteurs de ventilateur en | [W] |
| Q_d : Apport de chaleur des denrées | [J] |
| $Q_{éc}$: Apport de chaleur due à l'éclairage | [J] |
| Q_m : Charge thermique due aux matériels roulants | [J] |
| Q_p : charge thermique par transmission à travers les parois | [J] |
| Q_{per} : Charge thermique due aux personnes | [J] |
| q_{per} : Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne | [W] |
| Q_v : Apport de chaleur par ventilation | [J] |
| R_e : Résistance superficielle externe de la paroi | [m ² .°C/W] |
| R_i : Résistance superficielle interne de la paroi | [m ² .°C/W] |

Nomenclature

| | |
|--|-------------------|
| t : Durée de fonctionnement | [s/j] |
| T : le temps | [s] |
| t : Temps de fonctionnement des moteurs en | [s] |
| T_{in} : Température interne de la chambre négative | [°C] |
| T_s : Température de sol | [°C] |
| $V_{a.e}$: Volume de l'air entrant | [m ³] |
| V_{cf} : Volume de la chambre froide | [m ³] |
| V_i^s : Volume spécifique intérieur m ³ /kg | / |
| ΔT : différence de température entre le milieu extérieur et intérieur | [°C] |
| θ_f : Température final des denrées égale à la température de la chambre froide | [°C] |
| θ_i : Température initiale des denrées (avant refroidissement) | / |
| λ : conductivités thermique de La paroi en | [W/m. °C] |
| Ψ : Humidité relative de la chambre négative | [%] |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau III.1: Différents fluides et leurs impacts sur l'environnement..... | 31 |
| Tableau IV.1: Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne en activité moyenne dans une chambre froide | 40 |
| Tableau IV.2: Conductivité thermique et épaisseur de chaque matériau utilisé..... | 43 |
| Tableau IV.3: Résistance thermique superficiel des parois verticales de la chambre froide. | 44 |
| Tableau IV.4: Résistance superficielle des parois horizontales..... | 45 |
| Tableau IV.5: Quantité de chaleur totale échangée à travers les parois (Q_{ptot}) | 46 |
| Tableau V.1: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle..... | 53 |
| Tableau V.2: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle..... | 57 |
| Tableau V.3: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle..... | 61 |
| Tableau V.4: Tableau de performance comparatif pour le R404A, R134a, R717 | 65 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1: Organigramme de la direction générale de la Sarl Ibrahim & fils..... | 6 |
| Figure II.1: Compresseur à piston | 11 |
| Figure II.2: Compresseur scroll | 12 |
| Figure II.3: Compresseur mono vis | 13 |
| Figure II.4: Compresseur à vis birotor..... | 13 |
| Figure II.5: Fonctionnement du condenseur..... | 14 |
| Figure II.6: Détendeur capillaire | 15 |
| Figure II.7: Détendeur thermostatique | 16 |
| Figure II.8: Détendeur électronique..... | 17 |
| Figure II.9: Fonctionnement de l'évaporateur | 17 |
| Figure II.10: Fonctionnement d'une installation frigorifique..... | 18 |
| Figure II.11: Installation frigorifique a compression..... | 19 |
| Figure II.12: Installation frigorifique a gaz froid | 20 |
| Figure II.13: Installation frigorifique a absorption | 21 |
| Figure II.14: Installation frigorifique thermoélectrique | 22 |
| Figure II.15: Générateur de froid a vortex..... | 22 |
| Figure III.1: Logique de numérotation des fluides frigorigènes..... | 27 |
| Figure III.2: Décodage de la numérotation des fluides frigorigènes | 27 |
| Figure III.3: Classification des fluides frigorigènes | 28 |
| Figure III.4: Représentation de la molécule R11 | 32 |
| Figure V.1: Schéma de l'installation frigorifique..... | 51 |
| Figure V.2: Diagramme entropique de l'installation frigorifique | 52 |
| Figure V.3: Diagramme entropique de l'installation frigorifique | 57 |
| Figure V.4: Diagramme entropique de l'installation frigorifique. | 61 |

Introducción General

La production du froid est un paramètre fondamental qui intervient dans plusieurs applications des secteurs industriels notamment en pétrochimie, industrie pharmaceutique et plus particulièrement au niveau du secteur agro-alimentaire en raison des pertes et gaspillage alimentaire.

La production et la maîtrise du froid est aujourd'hui considérée comme un enjeu majeur notamment sur le plan énergétique. Actuellement les solutions adoptées pour pallier aux exigences liées à la production du froid sont basées sur des systèmes de réfrigération qui sont consommateurs d'énergie pour leur majorité [1]

Selon **Meunier et Colbourne** : « Les systèmes de production du froid et des pompes à chaleur étant hermétiques l'utilisateur de ces produits ne fait généralement pas attention aux fluides frigorigènes qu'ils contiennent et cela d'autant plus que leurs appellations (R134a, R124y...) est pour le moins étrange pour le commun des mortels. Mais bien que réputés hermétiques, ces systèmes fuient légèrement et les fluides qu'ils contiennent ont un impact sur l'environnement et du coup deviennent l'objet d'une attention particulière et suscitent l'intérêt des medias, le jour du 11 septembre 2013 le monde n'a pas hésité à les qualifier de supers gaz à effet de serre. A l'avenir l'emploi des fluides frigorigènes les plus utilisés va être réduite de $\frac{3}{4}$ (soit 79%) d'ici 2030 en Europe. Une page se tourne et on doit passer à d'autres fluides frigorigènes mais lesquels ? » Deux modèles professionnels et économiques s'opposent ; le premier prône, pour des fluides synthétiques à forte valeur ajoutée, donc cher et le deuxième modèle prône pour des fluides dits naturels à moins forte valeur ajoutée ; donc moins chers.[2]

Le choix d'un fluide ou d'un autre aura des conséquences importantes pour les professionnels ainsi que pour l'utilisateur final. Ce choix n'est par ailleurs pas toujours évident, c'est un compromis entre plusieurs critères : coûts de l'installation, consommation d'énergie, maintenance, sécurité du personnel et environnement. [3]

C'est suivant ce contexte que dans ce travail nous avons effectué une étude comparative entre trois fluides : R404A, R134a et le R717 afin de déterminer le fluide le plus optimal en termes de performances énergétiques et de l'impact sur l'environnement. De ce fait nous avons effectué une étude thermodynamique sur une installation frigorifique à Ifri fonctionnant avec le R404A et nous l'avons comparé avec le (R717, R134a) afin de déterminer le fluide le plus performant.

Introduction Générale

Dans ce sens, notre travail est structuré en cinq chapitres :

- Le chapitre I est consacré à la présentation de l'entreprise d'accueil ;
- Le chapitre II traite des généralités sur le froid ;
- Le chapitre III est dédié aux fluides frigorigènes ;
- Le chapitre IV représente le bilan thermique de la chambre froide ;
- Le chapitre V sera consacré à l'analyse thermodynamique de la machine frigorifique.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise Sarl Ibrahim & fils

I.1. Présentation de l'entreprise Ifri

I.1.1. Histoire de l'entreprise

La création de l'entreprise Ifri remonte à 1986 sous la désignation de « **LIMONADERIE IBRAHIM** », ce n'est qu'en 1996 qu'elle acquiert le statut juridique d'une SNC, puis elle hérite du statut juridique d'une Sarl. La notoriété de l'entreprise Ifri est grandissante au même titre que ses parts de marché au niveau national car elle est considérée comme leader national dans le marché des eaux embouteillées. Elle élargit désormais son marché vers l'international en exportant à destination de divers pays : (France, Canada, Espagne, Allemagne, Belgique, Angleterre, Luxembourg, Italie, ...)

L'entreprise Ibrahim & fils (Ifri) est une Sarl qui évolue dans le secteur l'agro-alimentaire, elle est spécialisée dans la production des eaux minérales et des boissons diverses non alcoolisées. Cette entreprise est située dans la zone industrielle Ahrik dans la commune d'IGHZER AMOKRANE daïra IFRI-OUZELLAGUEN wilaya de BEJAIA (ALGERIE). Elle possède deux sites de production : le premier est consacré à l'eau minérale et le deuxième qui est situé dans la zone industrielle de Taharacht au niveau de la commune de Akbou est consacré à la production de boisson diverses non alcoolisées.

Sarl Ibrahim & fils représente la maison mère du groupe Ifri puisqu'elle compte trois autres Sarl :

- **Sarl Général Plast** : spécialisée dans la fabrication de préforme en PET et bouchons en PEHD, elle -représente le premier fournisseur de Sarl Ibrahim & fils.
- **Sarl Bejaïa logistique** : elle assure l'acheminement des produits Ifri.
- **Sarl Huilerie Ouzellaguen** : spécialisée dans le raffinage et le conditionnement de l'huile d'olive.

I.2. Missions et objectifs de l'entreprise

I.2.1. Missions

La principale mission de l'entreprise Ifri est la production et la commercialisation de boissons diverses sur le marché, notamment : l'eau minérale naturelle, l'eau minérale gazéifiée, les sodas, les boissons fruitées et les boissons fruitées au lait.

I.2.2. Objectifs

Les objectifs de l'entreprise sont multiples à savoir :

- Augmenter le chiffre d'affaires de l'entreprise par l'augmentation des ventes
- Créer de la qualité et de la valeur dans les produits fabriqués.
- Devenir leader dans son domaine et jouir d'une réputation tant à l'échelle nationale qu'internationale, ...

I.2.3. Fiche signalétique

- **Raison sociale** : SARL IBRAHIM & FILS IFRI
- **Siège social** : Ighzer Amokrane-Ifri- Ouzellaguen 06010W.Bejaia, Algérie.
- **Statut juridique** : Sarl (société à responsabilité limitée)
- **Activités** : production d'eau minérale et autre boissons non alcoolisées.
- **Effectif moyen** : ±1500 personnes.
- **Capital** : 1600 000 000,00 DA.
- **Tel** : 213 (0) 34332020 034332662.
- **Fax** : 213 (0)34332652.
- **Email** : ifri@ifri-dz.com.

I.2.4. Concurrents de l'entreprise Ifri

Ifri évolue dans un marché concurrentiel, que se soit dans le domaine des boissons gazeuses ou bien dans le domaine des eaux minérales.

- **Dans le domaine des boissons gazeuses** : on retrouve notamment : Coca cola, Pepsi, Hamoud Boualem, Fanta, Rif, ...
- **Dans le domaine des eaux minérales** : on retrouve : Toudja, Lalla Khedidja, Ain Bouglez, Alma, Texenna, Ayris, ...

I.3. Organisation de l'entreprise Ifri

La Sarl Ibrahim & fils est dotée d'une structure fonctionnelle composée de quatre divisions principales comprenant chacune plusieurs directions et départements, chapeautés par la direction générale comme le montre l'organigramme suivant :

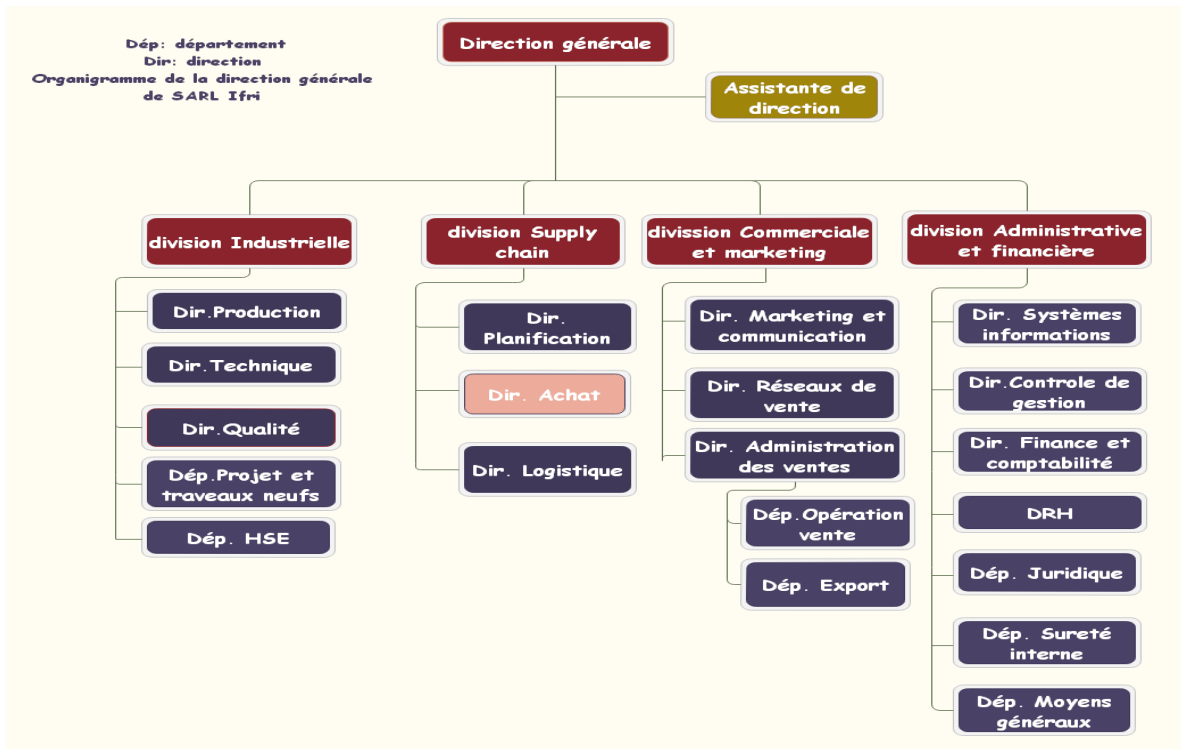


Figure I.1: Organigramme de la direction générale de la Sarl Ibrahim & fils

I.3.1. Direction générale

L'entreprise est dirigée par un directeur général qui applique les décisions prises par les différents conseils d'administration. Son rôle est de définir et contrôler la politique de gestion de l'entreprise.

I.3.2. Division administrative et financière

Avec ses directions : finance, comptabilité et contrôle de gestion, son rôle principal est :

- Assurer la conformité des opérations comptables.
- Etablir la situation financière.
- Gérer les recettes et les dépenses.

I.3.3. Division commerciale et marketing

Composée d'une direction marketing, communication et une direction réseau et administration des ventes. Ces directions prennent en charge :

- La réalisation des pro-formats et les ordres de versements pour les clients.
- Recevoir les bons de commande des clients

- Etablissement des factures et les bons de livraison.

I.3.4. Division industrielle

Composée d'une direction production, une direction technique et une direction qualité. Elle est responsable de la production, de la gestion de projet ainsi que de la gestion des équipements de tous les projets et de la sécurité industrielle.

I.3.5. Division supply chain

Cette division comprend la direction planification, la direction logistique et la direction achats.

La direction planification prend en charge la gestion des stocks matières premières et emballages, elle établit également les prévisions de production et de consommation des matières premières et planifie les tâches de chaque ligne quotidiennement et effectue le suivi et le pilotage de ces dernières.

La direction logistique est en charge de la gestion des flux d'entrée et de sortie des matières premières, la saisie de l'information sur logiciel, elle établit les bons de commande pour les produits chimiques, elle réalise également les bons de livraison, de réception et les bons de retour et de réintégration en interne, elle est aussi responsable de l'établissement de plans d'aménagement des espaces de stockage.

La direction achats est responsable de tous les achats qui concernent les différentes structures de la Sarl Ibrahim & fils, mais pas uniquement puisqu'elle prend également en charge l'achat de certaines matières premières pour l'une de ses filiales notamment Général plast. Cette direction assure également la gestion des achats (commandes, recherche de fournisseurs, suivi des commandes, négociation, contractualisation, ...), elle aussi responsable de l'efficacité en termes de qualité, coûts et délais et aligne sa politique de performance avec celle de l'entreprise en travaillant en cohésion avec les autres directions.

Chapitre II

Généralités sur le froid

II.1. La production du froid

L'homme fut exposé depuis longtemps aux problèmes de la conservation des aliments, ce qui l'a poussé à réfléchir pour trouver un moyen de les garder sous une basse température. C'est de là qu'est venue l'idée de production de froid. Qu'est-ce que la production du froid?

La production de froid est la réalisation d'une opération contre nature, c'est -à-dire ; absorber de la chaleur à température assez basse et la rejeter dans un milieu plus chaud, pour cela ; comme l'explique très bien le deuxième principe de la thermodynamique, il faut consommer de l'énergie mécanique. [4]

II.2. Historique

Très tôt l'homme a constaté que les denrées périssables qu'il utilisait pour se nourrir se conservaient beaucoup mieux en hiver que pendant la saison chaude. C'est à partir de ce point que l'homme était préoccupé à rechercher les moyens d'abaisser artificiellement la température pour prolonger la conservation des denrées.

Durant l'antiquité il collectait de la glace naturelle à partir des cours d'eau, des sommets de montagne et des étangs gelés, ensuite il la mettait en réserve dans des cavités souterraines.

Plus récemment au XIX^{ème} siècle (19^{ème}) la production de froid se développa rapidement avec l'avancement des connaissances en électricité.

- 1805 : La première machine frigorifique à compression d'éther est imaginée par l'Américain Evans ;
- 1835 : Un autre Américain, Perkins, réalise à Londres le premier circuit frigorifique avec de l'éther comme fluide frigorigène. Cette machine, qui fabrique de la glace, n'a pas retenu l'attention des industriels. L'industrie du froid ne prend son essor que plusieurs dizaines d'années plus tard, notamment avec l'emploi des moteurs électriques ;
- 1844 : Création de la machine frigorifique à air ;
- 1859 : Apparition de la première machine frigorifique à absorption ;
- 1913 : Le premier réfrigérateur domestique fait son apparition ;
- 1919 : La marque Frigidaire fait son apparition ;
- 1928 : Découverte des molécules de CFC 12 par Midgley & Henne de la division Frigidaire de General Motors ;
- 1931 : La fabrication industrielle commence avec Electrolux ;

- 1950 : Démocratisation des réfrigérateurs ;
- 1964 : Les réfrigérateurs à 2 portes font leurs apparitions ;
- Années 70 : Les appareils s'accessoirisent : lumière, différents compartiments ;
- Années 80 : Apparitions des premiers réfrigérateurs combinés et des appareils bimoteurs
- Années 90 : De nouveaux gaz plus propres sont utilisés ;
- Années 2000 : Le véritable défi devient l'environnement. [5]

II.3. Domaines d'utilisation du froid

- **Industries mécaniques** : pour le durcissement des matériaux ou le traitement des Surfaces.
- **Domaine médical** : cryochirurgie, conservation de certains produits (organes ...).
- **Industrie alimentaire** : conservation des aliments, pasteurisation des liquides...
- **Industries chimiques et pétrochimiques** : liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinage, débenzolage...
- **Génie civil** : refroidissement des bétons, congélation des sols aquifères...
- **Conditionnement des locaux** : rafraîchissement de l'air, conditionnement des patinoires, canons à neige...
- **Laboratoire d'essai et de recherche** : étude des matériaux et comportement de la matière à très basse température...
- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température (-80°C) [6]

II.4. Les machines frigorifiques

Une machine frigorifique, est une machine thermodynamique destinée à maintenir un local ou un milieu à une température inférieure à celle du milieu environnant.

C'est donc un système qui transfère des calories d'un milieu à bas niveau de température vers un milieu où la température est supérieure.

L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps chaud vers un corps froid, donc on peut définir également la machine frigorifique comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est-à-dire d'un milieu froid vers un milieu plus chaud. Une dépense d'énergie sera bien entendu inévitable

pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système ait un quelconque intérêt. [6]

II.5. Les différents éléments d'une installation frigorifique

Dans une installation frigorifique on trouve 4 éléments essentiels : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur.

II.5.1. Compresseur

Est l'élément qui aspire le gaz basse pression et basse température qui quitte l'évaporateur pour le renvoyer vers le condensateur sous haute pression et sous haute température.

On distingue 3 types de compresseur utilisé pour la production du froid :

- Compresseur à piston.
- Compresseur à vis.
- Compresseur scroll.

II.5.1.1. Compresseur à piston

On utilise un ou plusieurs pistons coulissants de manière étanche dans un cylindre pour comprimer le fluide frigorigène, admis dans le cylindre par l'intermédiaire d'un clapet ou d'une soupape, grâce à l'aspiration provoquée par le recul du piston. [8]

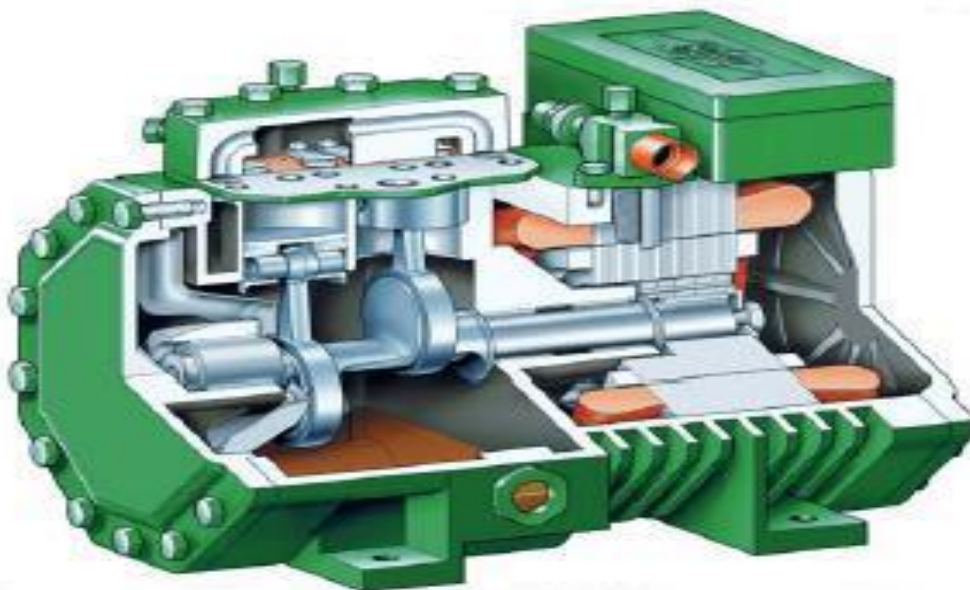


Figure II.1: Compresseur à piston [7]

II.5.1.2. Compresseur scroll

Un rotor sous forme de spirale comprime le gaz en continu en tournant autour d'une autre spirale fixe.



Figure II.2: Compresseur scroll. [7]

II.5.1.3. Compresseur à vis

Une vis sans fin tourne pour comprimer le gaz entre le cylindre et une pièce rotative qu'elle entraîne. C'est un type de compresseurs, généralement multi-étagé, destiné à des applications spécifiques et utilisés pour de grandes puissances.

On distingue deux types de compresseurs à vis, les compresseurs mono vis (mono rotor) et les compresseurs double vis (birotors) : [8]

A. Compresseur mono vis

Ces compresseurs se composent d'un rotor cylindrique entraînant rainuré hélicoïdalement et de deux satellites entraînés. Le tout est logé dans un carter avec un très faible jeu.

Le principe de fonctionnement du compresseur mono vis :

- Phase d'aspiration : le fluide frigorigène remplit les rainures du rotor.
- Phase de compression : au fur et à mesure de la rotation, le fluide est emprisonné entre les rainures du rotor et les dents du satellite, le volume diminue et la pression augmente.

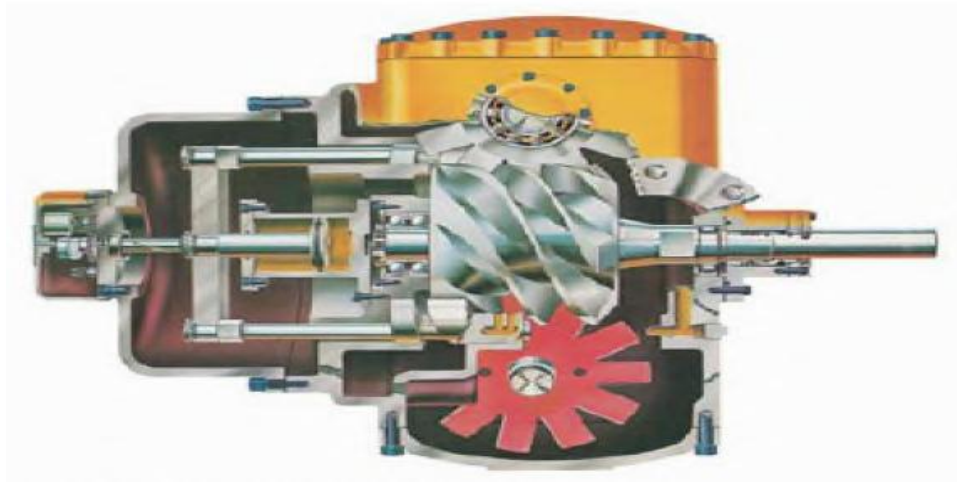


Figure II.3: Compresseur mono vis.[7]

B. Compresseur à vis birotor

Ce type de compresseur est le plus courant, il compte deux rotor à dentures Hélicoïdales (un rotor mâle est un rotor femelle) usiné en hélice, tournant à grande vitesse. Le rotor mâle formant les lobes est entraîné par le moteur et entraîne à son tour le rotor femelle qui forme des alvéoles. Pendant la rotation, les alvéoles jouent le rôle d'un cylindre dont le volume du gaz frigorigère se réduit progressivement alors que les lobes jouent le rôle du piston.

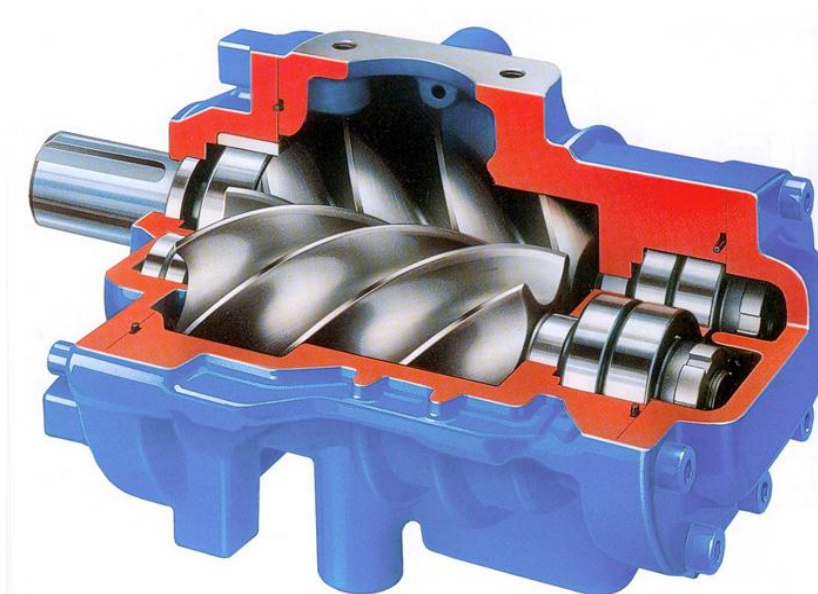


Figure II.4: Compresseur à vis birotor.[7]

II.5.2. Condenseur

Le condenseur est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air.

Cette évacuation de chaleur s'effectue en trois étapes :

- La désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (évacuation par Chaleur sensible – tronçon AB)
- La condensation des vapeurs (évacuation par chaleur latente – étape principale – tronçon BC)
- Le sous refroidissement du fluide frigorigène liquide (évacuation par chaleur sensible – tronçon CD). [9]

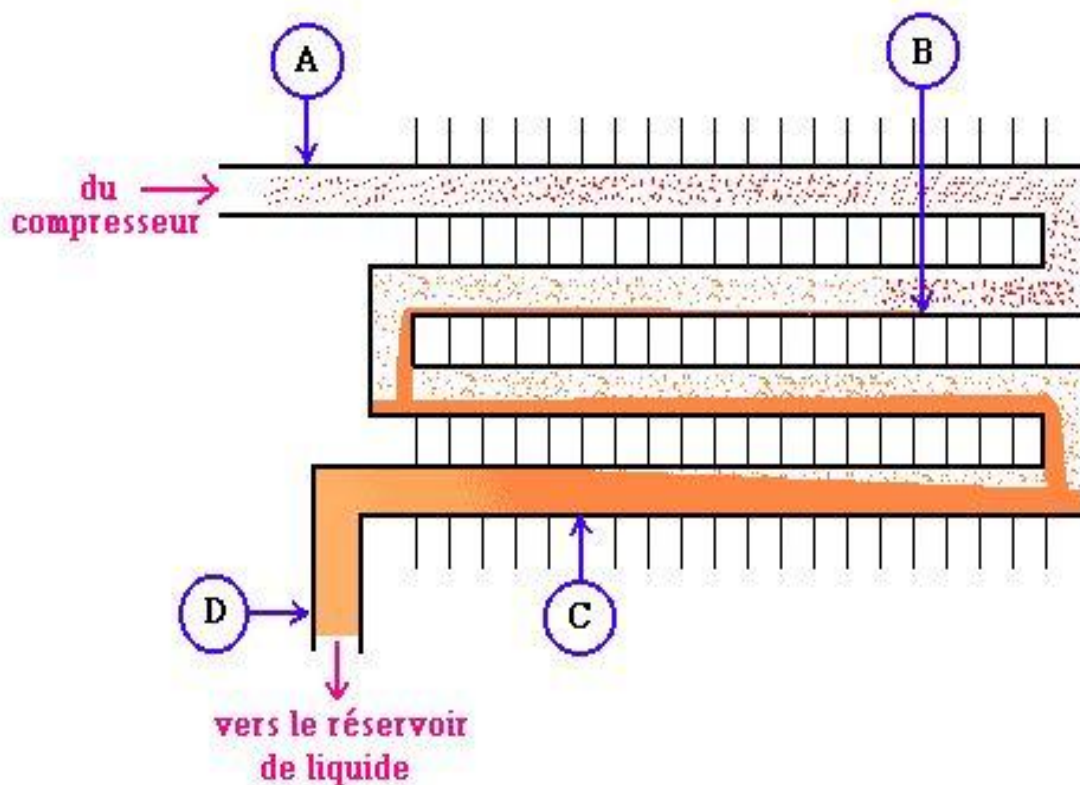


Figure II.5: Fonctionnement du condenseur. [9]

On distingue deux types de condenseurs :

II.5.2.1. Condenseurs à air

Dans ce type d'échangeur les gaz surchauffés cèdent la chaleur au contact avec l'air et se condense. On distingue deux types de condenseur à convection naturelle et a convection forcée.

II.5.2.2. Condenseurs à eau

Ce type de condenseur utilise l'eau comme caloporteur pour assurer la liquéfaction du fluide frigorigène, il représente l'avantage d'avoir un coefficient d'échange global plus élevé contrairement au condenseur à air. On cite parmi ce type d'échangeur :

- Condenseurs horizontaux multitubulaires ;
- Condenseurs verticaux multitubulaires ;
- Condenseurs coaxiaux ;
- Condenseurs à plaques [9]

II.5.3. Détendeur

Le détendeur permet de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à basse température dans l'évaporateur.

On distingue trois types du détendeur :

II.5.3.1. Détendeur capillaire

C'est un tube de faible diamètre intérieur (de 0.6 à 2.8 mm) et d'épaisseur de 1mm. L'alimentation de l'évaporateur dépend uniquement de la perte de charge du tube capillaire (la longueur est calculée pour la puissance à fournir). [10]



Figure II.6: Détendeur capillaire. [11]

II.5.3.2. Détendeur thermostatique

C'est l'organe d'alimentation d'évaporation le plus utilisé, il permet la régulation du fluide frigorigène d'une façon à maintenir une surchauffe correcte des vapeurs à la sortie. Il permet ainsi un remplissage optimal de l'évaporateur et évite les coups de liquide, quelle que soit la charge thermique.

La surchauffe représente la différence entre la température des vapeurs à la sortie d'évaporateur et la température d'ébullition du fluide frigorigène .[9]

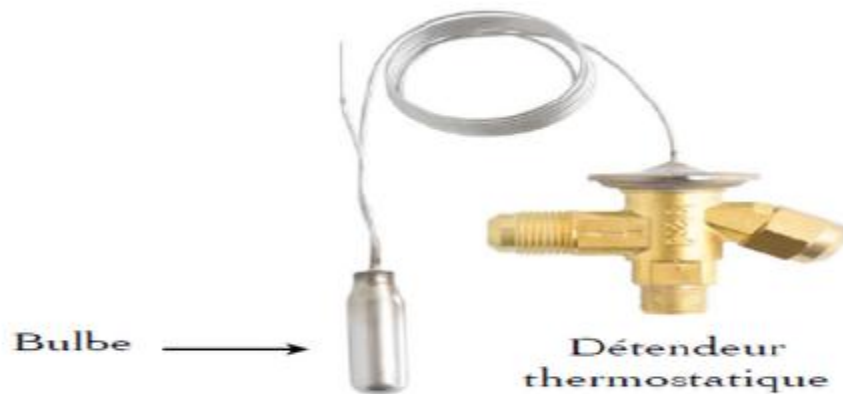


Figure II.7: Détendeur thermostatique [13]

II.5.3.3. Détendeur électronique

Un détendeur électronique comprend un régulateur électronique, un détendeur, deux capteurs de température et un capteur de pression. En effet, la grandeur réglée n'est plus la surchauffe des vapeurs, mais la différence de leur température entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur. À cause des pertes de charge, la consigne réglée est donc supérieure à la surchauffe.

On trouve maintenant des détendeurs électroniques avec un capteur de température et un capteur de pression. Avec la conversion $T_{sat} = f(p)$ pour le fluide frigorigène considéré. Le détendeur peut alors contrôler la surchauffe ($T - T_{sat}$) en sortie d'évaporateur.

Le régulateur peut éventuellement remplir une ou plusieurs fonctions complémentaires, telle que thermostat, alarme, arrêt de l'installation par pump-down [12]



Figure II.8: Détendeur électronique [14]

II.5.4. Evaporateur

L'évaporateur peut être considéré comme point de capture de la chaleur dans un système frigorifique, il a pour fonction de prélever la chaleur à son environnement et de la céder au fluide frigorigène. La température d'évaporation doit être située lors de ce processus au-dessous de la température ambiante. Le flux de chaleur généré entre l'évaporateur et le milieu ambiant, grâce à la différence de température, entraîne dans l'évaporateur une évaporation du fluide frigorigène.

Selon la nature du fluide à refroidir on distingue deux types de refroidisseur, les refroidisseurs à air et refroidisseur à eau [15]

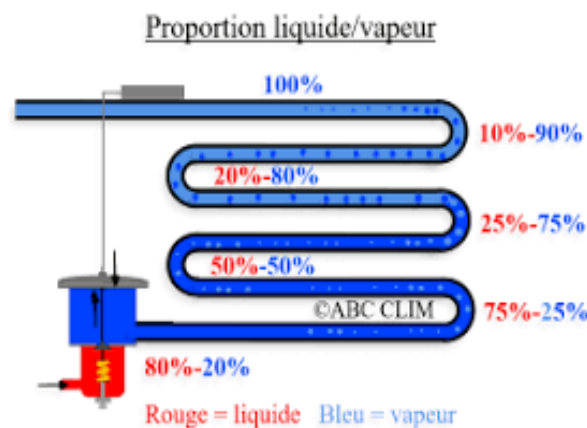


Figure II.9: Fonctionnement de l'évaporateur [16]

II.6. Fonctionnement d'une installation frigorifique

Le fluide frigorigène est aspiré par le compresseur sous forme de gaz à basse pression. Au passage dans celui-ci, il évolue de basse en haute pression. Il arrive au condenseur et se refroidit par l'air qui y circule à contre-courant, il change progressivement d'état pour être complètement liquide à la sortie. Dans le condenseur, le fluide frigorigène libère de la chaleur en se condensant. Le passage dans le détendeur fait chuter sa pression et par voie de conséquence, sa température. Il est à l'état liquide basse pression. En cheminant dans l'évaporateur, il s'évapore en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. Il fournit donc du froid. Le fluide frigorigène se trouve à l'état vapeur basse pression, pour revenir au compresseur et recommencer son cycle.

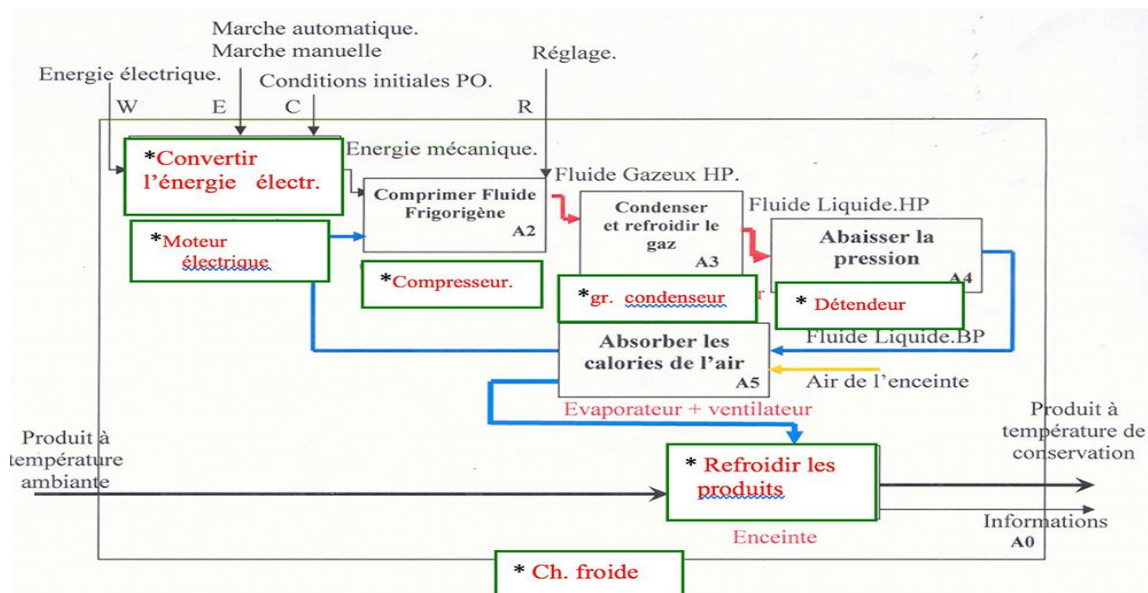


Figure II.10: Fonctionnement d'une installation frigorifique [17]

II.7. Différents types d'installations frigorifiques

Parmi les différents types d'installations frigorifiques, il faut retenir, les installations frigorifiques à compression, installations frigorifiques à gaz froid (principe de Stirling), installations frigorifiques à absorption, la production du froid thermoélectrique (élément Peltier) et les générateurs de froid à Vortex.

II.7.1. Installation frigorifique a compression

Sont les systèmes frigorifiques les plus courants dans la pratique. Dans une installation frigorifique à compression, un agent réfrigérant traverse le circuit de l'agent

réfrigérant, et y subit différentes transformations d'état. L'installation frigorifique à compression est basée sur l'effet physique selon lequel de l'énergie thermique est nécessaire pour le passage de l'état liquide à l'état gazeux. L'évaporateur 2 prélève de l'énergie thermique dans l'espace à refroidir 1. En faisant varier la pression lors de l'évaporation et de la condensation, on peut ajuster le niveau de la température de manière à provoquer un transport de chaleur du côté froid vers le côté chaud. La condensation 4 de l'agent réfrigérant permet de libérer à nouveau l'énergie thermique.

Pour augmenter la pression, il est possible d'utiliser, à la place du compresseur à piston 3 représenté, des compresseurs à vis, scroll, turbo ou à jet de vapeur [18]

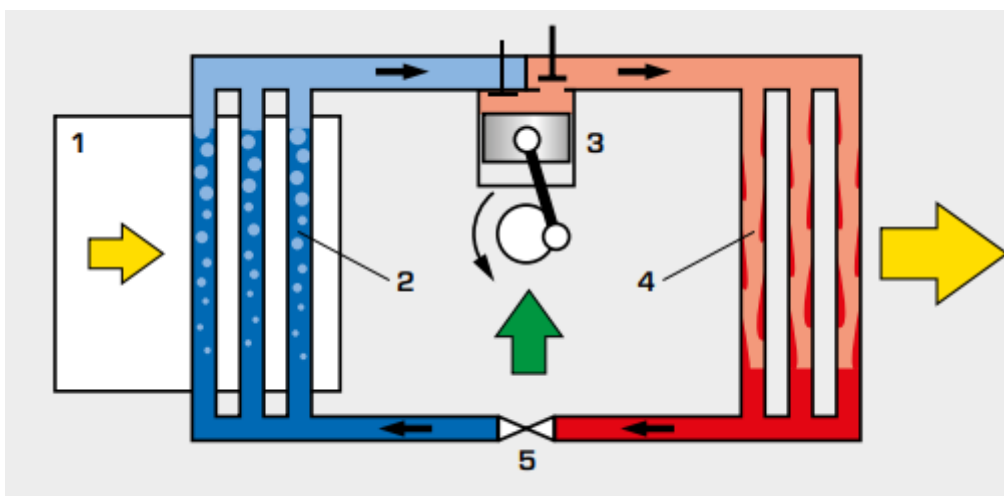


Figure II.11: Installation frigorifique a compression [18]

II.7.2. Installation frigorifique a gaz froid

L'installation frigorifique à froid est une solution de niche absolue dans la pratique. Elle fonctionne selon le même principe que le moteur Stirling, mais dans la direction opposée.

La machine frigorifique de Stirling permet de réaliser des températures très basses, dans le cas par ex. de la liquéfaction des gaz ou lors du refroidissement des caméras infrarouges. La machine frigorifique de Stirling est composée d'un cylindre de travail 6 et d'un cylindre de déplacement 7. Dans le cylindre de travail, un gaz de travail est comprimé et détendu en alternance. Le gaz chaud comprimé libère sa chaleur dans l'échangeur de chaleur 4. Durant la détente, le gaz de travail refroidit et absorbe de la chaleur de la pièce 1 à refroidir du côté froid 2 du cylindre de déplacement. Le piston de déplacement 8 et le piston

de travail 6 sont déplacés en conséquence de manière déphasée par le mécanisme bielle-manivelle 5[18]

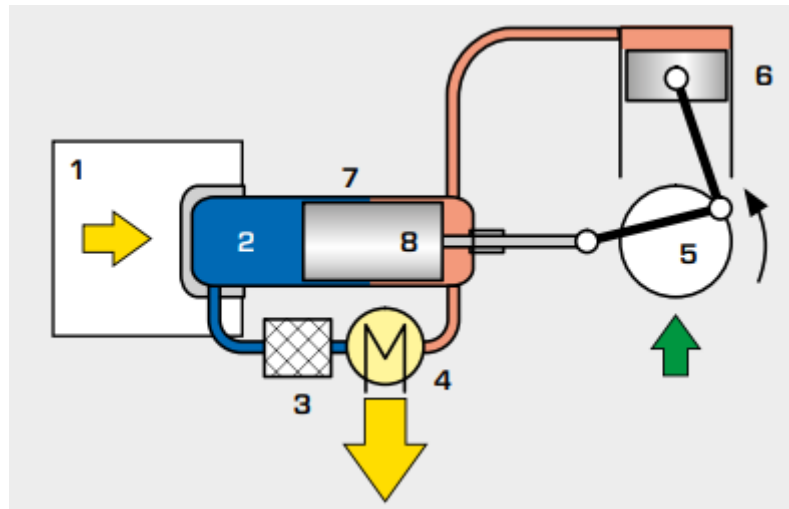


Figure II.12: Installation frigorifique a gaz froid [18]

II.7.3. Installation frigorifique a absorption

Contrairement à l'installation frigorifique à compression, l'installation frigorifique à absorption fonctionne avec deux fluides de travail, un agent réfrigérant et un solvant. Un apport d'énergie thermique permet de séparer les deux fluides de travail l'un de l'autre dans l'éjecteur 4. La vapeur d'agent réfrigérant rejetée s'écoule dans le condenseur 3 où elle se condense. Puis l'agent réfrigérant s'évapore à basse pression dans l'évaporateur 2 en libérant de la chaleur. La vapeur d'agent réfrigérant formée s'écoule alors dans l'absorbeur 5, où elle est absorbée par le solvant. Puis la solution composée d'agent réfrigérant et de solvant retourne dans l'éjecteur.

L'utilisation d'installations frigorifiques à absorption est judicieuse lorsque de l'énergie thermique, p.ex. de la chaleur perdue, est disponible. En effet, il est possible dans ce cas d'utiliser la chaleur perdue pour réaliser le refroidissement. [18]

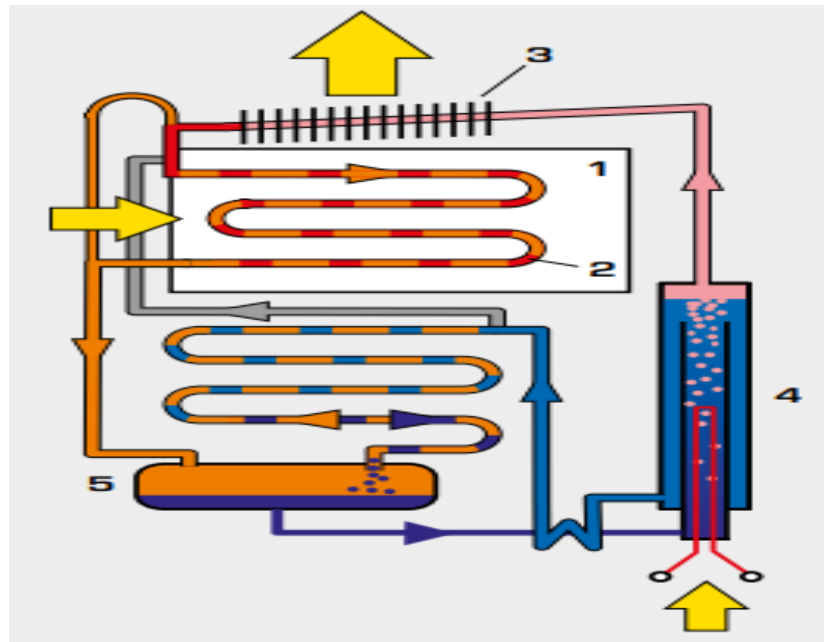


Figure II.13: Installation frigorifique à absorption [18]

II.7.4. Installation frigorifique thermoélectrique

Les installations frigorifiques thermoélectriques sont basées sur l'effet Peltier. Un élément Peltier génère un différentiel de température au moyen d'un courant électrique; il peut être utilisé soit pour chauffer, soit pour refroidir, en fonction de la direction du courant.

Le courant passe à travers un élément thermoélectrique. Lors de ce passage, un contact électrique chauffe, tandis que le second refroidit. Afin d'augmenter la puissance, plusieurs éléments thermoélectriques sont montés en série; ils sont disposés de manière à ce que les contacts de refroidissement et de chauffage soient chacun reliés à une plaque de couverture. Lorsque le courant circule, de la chaleur est prélevée sur l'une des plaques et transférée à l'autre. La plaque froide correspond à la partie utile de l'installation frigorifique thermoélectrique.

Les éléments Peltier peuvent générer des températures très basses. Cependant, lorsque le différentiel de température augmente, le rendement baisse. Les éléments Peltier sont faciles à réguler, n'ont pas de composants mobiles et sont exempts de combustibles toxiques. [18]

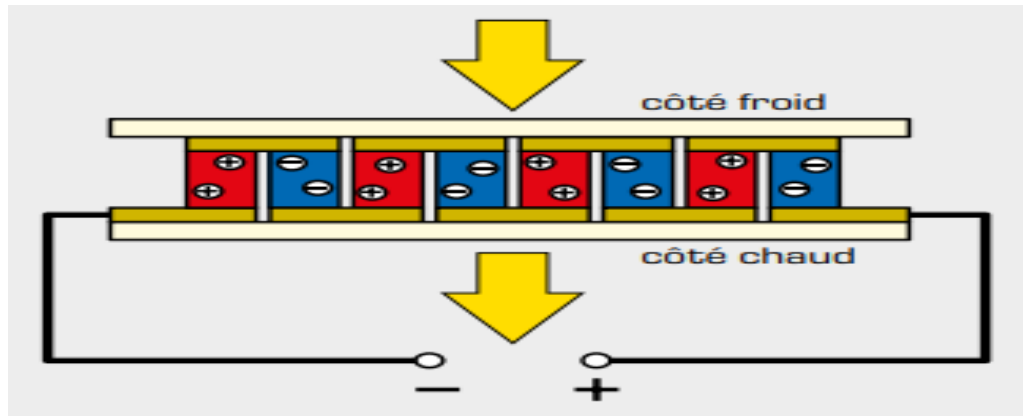


Figure II.14: Installation frigorifique thermoélectrique [18]

II.7.5. Générateur de froid a vortex

Le générateur de froid à Vortex fonctionne selon un principe bien particulier. De l'air comprimé est amené dans l'orifice d'entrée 1. L'air comprimé est introduit tangentielllement dans la chambre de tourbillon 2 où il est mis en rotation. Un écoulement d'air froid se forme au centre de ce tourbillon, tandis que la couche externe du tourbillon se chauffe. L'écoulement d'air froid est dévié du milieu du tourbillon et utilisé pour le refroidissement.

L'avantage du générateur de froid à Vortex réside dans sa conception particulièrement simple, dépourvue de composants mobiles, de combustibles toxiques ou d'alimentation électrique. Il a néanmoins l'inconvénient d'offrir un faible rendement. [18]

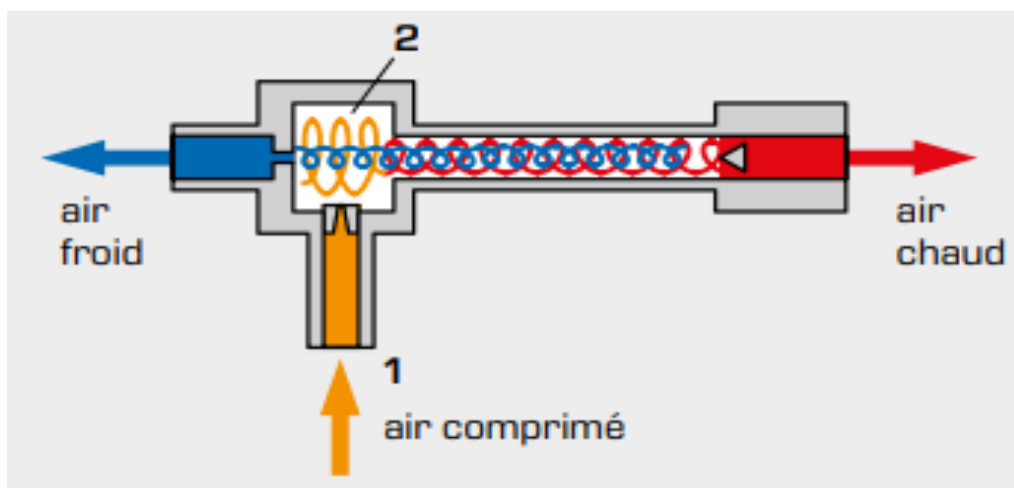


Figure II.15: Générateur de froid a vortex [18]

II.8. Isolation des chambres froides

L'isolation d'une chambre froide a une importance capitale sur le fonctionnement général de l'installation. L'isolation permet de diminuer le coût des frigorifiques produites et limite les échanges thermiques entre le milieu extérieur et le milieu intérieur[19]

Un bon isolant doit :

- Avoir une faible densité.
- Avoir une très faible conductivité thermique.
- Avoir une bonne résistance à la diffusion de la vapeur.
- Être non hygroscopique.
- Être imputrescible.
- Être résistant, et stable entre certaines limites de température.
- Être ininflammable.
- Être sans action sur le fer ou les matériaux en contact.
- Être d'un prix raisonnable.
- Conserver constante dans le temps, ses qualités d'isolation.

II.8.1. Types d'isolants

Les matériaux les plus utilisés comme isolant sont :

A. Le liège

- Prix élevé.
- Bonne résistance mécanique et stable dans le temps.
- Masse volumique : 110 à 130 kg/m³.
- Conductivité thermique : 0.044 w/m .K.

B. La fibre de verre

- Bonne résistance à l'effritement.
- Masses volumiques les plus utilisées en isolation frigorifique : 22 kg/m³ (Panneaux semi rigide PI 156), et 29 kg/m³ (panneaux rigides PSF).
- Conductivité thermique (0.035 w/m. K).

C. Le polystyrène expansé

- Prix moyen.
- Résistance mécanique moyenne.

- Stable dans le temps.
- Isolation et pare-vapeur très bon mais inflammable et léger.
- Masse volumique : 20 à 30 kg /m³.
- Conductivité thermique : 0.029w.m. k

D. Les mousses de polyuréthane

- Masse volumique : 30 à 40 Kg/m³
- Conductivité thermique : 0. 027 w/m. k
- Prix moyen.
- Leger.
- Résistance mécanique moyenne.
- Stable dans le temps.

E. Les Caoutchoucs mousses

- Isolation des circuits frigorifiques et gaine d'air.
- Masse volumique: 90 Kg/m³ (tube) et 113 kg/m³ (plaque).
- Conductivité thermique 0.03 W /m. K

F. La Laine de verre

- Très bon isolant thermique et acoustique.
- Un des matériaux d'isolation les moins chers du marché.
- Incombustible et résistante au feu.
- Durée de vie élevée.
- Non utilisée pour le sol.
- Conductivité thermique: 0.035 W / m .K

G. La Laine de roche

- Très bon isolant.
- Cout acceptable.
- Masse volumique : 21 à 250 kg/m³
- Conductivité thermique: 0.093 W / m .K

Chapitre III

Les fluides frigorigènes

III.1. Fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont les fluides de travail vitaux au cœur du cycle de compression de vapeur, déplaçant la chaleur d'une température plus basse à une température plus élevée. [20]

Le système de réfrigération par cycle de compression de vapeur est constitué par l'évaporateur, le détendeur, le compresseur et le condenseur. Ces organes ont pour rôle de faciliter le changement d'état du fluide frigorigène et de le mettre en mouvement. L'eau peut être utilisé comme fluide frigorigène mais ses propriétés physiques ne sont pas toujours satisfaisantes [21]

III.2. Nomenclature et propriétés de certains fluides frigorigènes

III.2.1. Nomenclature des fluides frigorigènes

La nomenclature des fluides frigorigènes est donnée par la norme ANSI/ASHRAE 34.

Cette classification permet de classer de façon claire et univoque la totalité des fluides frigorigènes. Le code d'identification comprend un préfixe constitué de lettres et un suffixe constitué de chiffres.[2]

A. Les Préfixes

Un fluide frigorigène est caractérisé par un préfixe R (pour le R du mot anglais refrigerant) suivi de plusieurs chiffres (WXYZ) : R-WXYZ.

On utilise parfois un préfixe matérialisant la nature du fluide comme : CFC, HCFC, HFC ou HC pour hydrocarbure.

B. Les suffixes

Les suffixes qui suivent le préfixe sont définis comme suit suivant la nature du fluide.[2]

- La logique de numérotation est expliquée ci-dessous :

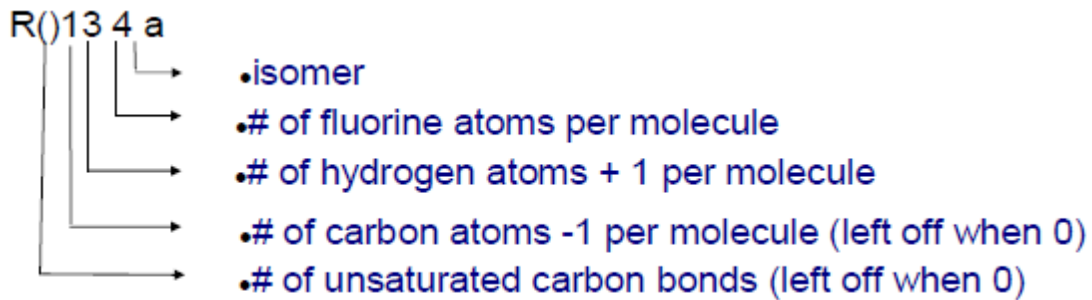


Figure III.1: Logique de numérotation des fluides frigorigènes [22]

Une simple méthodologie pour décoder la logique de numérotation ci-dessus peut être résumé dans la figure :

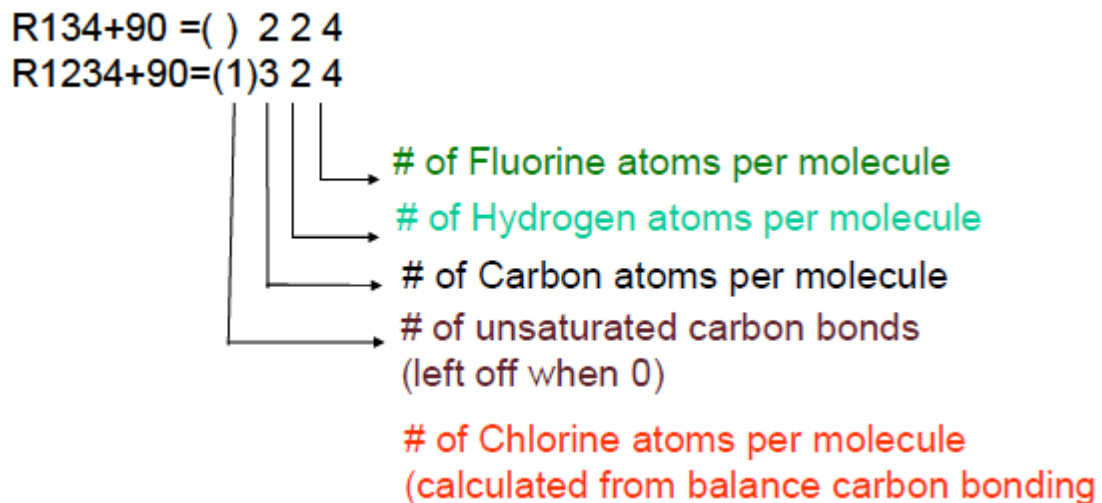


Figure III.2: Décodage de la numérotation des fluides frigorigènes [22]

III.2.2. Propriétés de quelques fluides frigorigènes

On retrouve plusieurs propriétés qui caractérisent les fluides frigorigènes parmi lesquelles on retiendra le nom, la catégorie et la formule chimique, ainsi qu'un certain nombre de propriétés physiques (masse molaire et les températures d'ébullition ainsi que critique). Des propriétés liées à l'inflammabilité et la valeur limite moyenne d'exposition (pour une moyenne de 8 h/jour) et enfin le groupe d'appartenance d'un point de vue de la sécurité et le PRG100 sont autant de caractéristiques qui doivent être prises en considération. (voir annexe) [2]

III.3. Les différents fluides frigorigènes

Il existe plusieurs types de fluides frigorigènes répertoriés selon plusieurs familles comme le montre la **figure A**. Le (**R717**), le (**R404A**) et le (**A134a**) qui sont les trois principaux fluides retenus pour l'étude dans ce présent mémoire.

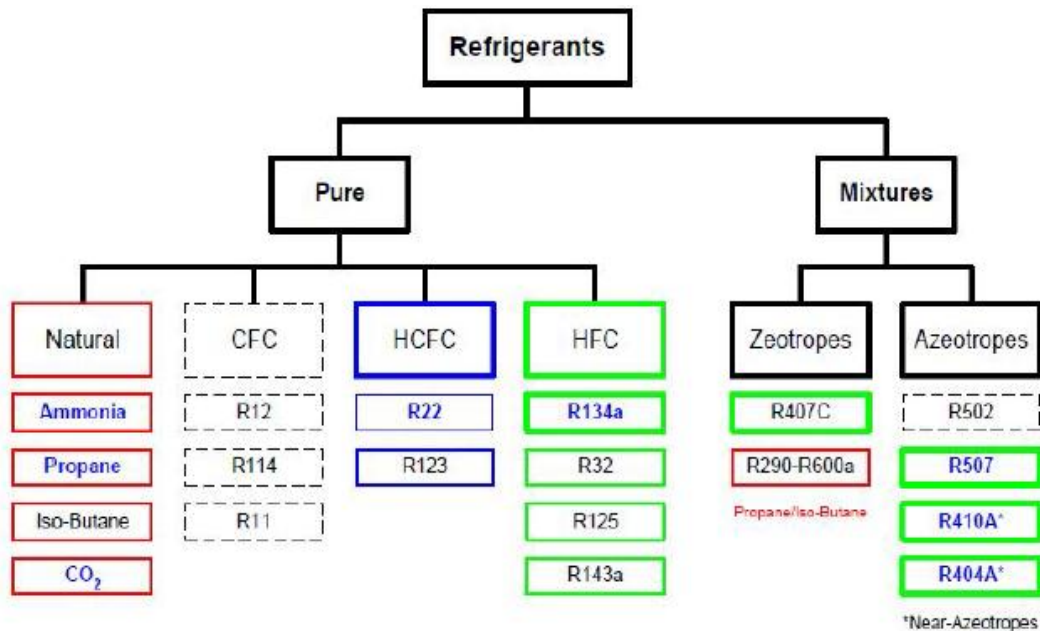


Figure III.3: Classification des fluides frigorigènes [22]

III.3.1. Fluides naturels (série des 700)

Les seuls fluides naturels ou inorganiques sont en fait l'air et l'eau. Le CO₂, le propane, l'isobutane et l'ammoniac sont tous transformés chimiquement. Dire qu'ils sont naturels n'est donc pas exact, il vaut mieux les qualifier de fluides à faible GWP. Ils sont classés dans la série des R700. L'appellation normalisée est R700 auquel il faut ajouter la valeur de la masse moléculaire.

Exemple :

$$\text{L'eau (H}_2\text{O)} = \text{R} (700 + 2 + 16) = \text{R718}$$

$$\text{L'ammoniac (NH}_3\text{)} = \text{R} (700 + 14 + 3) = \text{R717}$$

$$\text{ODP} = 0$$

$$\text{GWP}_{100} = 0$$

Le dioxyde de carbone (CO_2) = R (700 + 12 + 32) = R744

ODP = 0

GWP₁₀₀ = 1

III.3.2. Fluides hydrocarbures (série des 600)

Les hydrocarbures légers sont également de très bons réfrigérants l'inconvénient majeur est qu'ils sont très inflammables, potentiellement explosifs et donc dangereux. Leurs utilisations sont limitées voir interdite dans les bâtiments publics et immeubles de grandes hauteurs. Leurs emplois se résument comme fluide frigorigène de cycles à compression en pétrochimie. [21]

III.3.3. Les hydrocarbures halogénés (série 400 et 500)

Ces composées sont non toxiques et ininflammables. L'avantage de ces fluides est qu'ils peuvent se prêter à un grand nombre d'application et qu'ils présentent des risques minimales même en cas de fuite. On distingue les hydrofluorocarbures (HFC), les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluoro carbures (HCFC) et les hydrofluorooléfine (HFO). [21]

III.3.3.1. Les hydrofluorocarbures (HFC)

Les réfrigérants HFC ne contiennent pas de chlore. Bien que ces réfrigérants aient un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone de zéro, ils contribuent toujours au problème du réchauffement climatique [23].

Le plus connu des HFC est le R134a.

ODP de ce fluide : 0.

GWP₁₀₀ = 1 430 selon IPCC 4 et 1 300 selon IPCC 5.

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : $-26,08\text{ °C}$. L'indice « a » indique que la molécule est isomérique. Constitution la molécule : 2 atomes de carbone, 2 atomes d'hydrogène et 4 atomes de fluor. Le R134a est à ce jour très utilisé, cependant, son potentiel de réchauffement étant relativement élevé (1 300), son remplacement par des fluides à faible GWP est dès à présent envisagé [3]

III.3.3.2. Les chlorofluorocarbures (CFC)

C'est une famille de réfrigérants contenant du chlore, du fluor et du carbone. Puisqu'ils ne contiennent pas d'hydrogène les CFC sont chimiquement très stables, même lorsqu'ils sont rejetés dans l'atmosphère. On constate qu'ils ont une longue durée de vie dans l'atmosphère. Dans la basse atmosphère, les molécules de CFC absorbent le rayonnement infrarouge et contribuent au réchauffement atmosphérique ou qui ont un potentiel de réchauffement global très élevé [23]

III.3.3.3. Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC)

La modification du composé chimique des CFC, en remplaçant un atome d'hydrogène par un ou plusieurs atomes de chlore ou de fluor, a donné lieu à une réduction significative de la durée de vie de la molécule et donc, réduit l'impact négatif qu'il peut avoir sur l'environnement. Cette catégorie de fluides frigorigènes contient à la fois du chlore et de l'hydrogène. Même s'ils contiennent du chlore, qui est nocif pour la couche d'ozone, ils contiennent également l'hydrogène qui les rend chimiquement moins stables lorsqu'ils entrent dans l'atmosphère. [23]

III.3.3.4. Les hydrofluorooléfines (HFO)

Il s'agit de fluides de synthèse. Les HFO sont des fluides récents à ODP zéro et à faible GWP. Ce faible GWP s'explique par la faible durée de vie de la molécule dans l'atmosphère. [3]

III.3.4. Les azéotropes

Les mélanges sont définis par des numéros d'identification et la proportion en masse des fluides frigorigènes auxquels ils correspondent : les fluides frigorigènes doivent être désignés dans l'ordre croissant de leur température d'ébullition. [2]

Les azéotropes sont des mélanges. Les azéotropes ont un comportement analogue aux fluides purs, c'est-à-dire qu'à l'état saturant, leur relation pression- température est constante. Ils sont classés dans la série des R500. Le premier azéotrope mis au point est le R500, le second est le R501, etc. [3]

III.3.5. Les zéotropes

Les zéotropes sont des mélanges. Ils sont classés dans la série des R400, leur appellation correspond à l'ordre de leur codification : R401 ; R402, etc.

Ces mélanges ont des glissements de température. Les glissements correspondent à des changements de température lors du changement d'état à pression constante. En fonction des fluides, ces glissements peuvent varier de quelques dixièmes de degré jusqu'à 10 °C. Exemple de fluide zéotropique : R404A

Composition : 44 % de R125 ; 52 % de R143a et 4 % de R134a.

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 46,5 °C

(température de bulle) et - 45,7 (température de rosée).

III.4. L'impact sur l'environnement

La prise de conscience environnementale a conduit à la recherche de fluides frigorigènes ayant le moins d'impact possible sur l'environnement. Le premier impact environnemental constaté a été la dégradation de l'ozone stratosphérique due au chlore. En conséquence, les fluides les plus chlorés ont d'abord été abandonnés, il s'agit des CFC (R12, R11, etc.). Des fluides moins chlorés (les HCFC) ont alors été majoritairement employés. Cependant, la prise de conscience environnementale étant de plus en plus répandue, les HCFC ont à leur tour été supprimés (R22, etc.). Des fluides non chlorés ont alors été largement utilisés (HFC) [3]

Tableau III.1: Différents fluides et leurs impacts sur l'environnement [24]

| Fluides inorganiques | Fluides hydrocarbures (Série 600) | Fluides hydrocarbures halogénés (Série 400 et 500) | | | | Autres fluides |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | | CFC (Chloro Fluoro Carbur es) | HCFC (Hydro Chluoro Fluoro Carbures) | HFC (Hydro Fluoro Carbure) | HFO (Hydro Fluoro-Oléofine s) | |
| Eau (H2O), Ammoniac (NH3), | Butane, Isobutane, propane, | R11, R 12, R13, R 111, R | R 21, R 22, R 31, R 121, R 409A | R 23, R 32, R 134a, R 404 A, R | R1234yf , R1234ze | R 630, R 631, R 12B1, R 13B1 |

| | | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | cyclopropane, propylène | 112, R 502 | | 407F, R 410A | | |
| Très faible impact sur l'environnement | Faible impact sur l'environnement | Dangereux pour la couche d'ozone | Dangereux pour l'environnement | Contribuent à l'effet de serre | Faible impact sur l'environnement | Rarement utilisés |

Afin de déterminer l'impact des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone ainsi que sur l'effet de serre trois principaux indicateurs ont été créés :

- **ODP** : Ozone Depletion Potential (influence sur la couche d'ozone)
- **GWP** : Global Warning Potential (influence sur l'effet de serre)
- **TEWI** : Total Equivalent Warning Impact [1]

III.4.1. ODP (Potentiel de destruction de l'ozone)

C'est un indice qui caractérise la participation de la molécule à la destruction de la couche d'ozone [1] La molécule qui sert de référence au calcul de l'ODP est le **R11**. Le R11 est le trichlorofluorométhane dont la formule est **CCl₃F**. Les fluides comportant un ou plusieurs atomes de chlore dans leur molécule ont un ODP supérieur à zéro. Tous les fluides chlorés sont actuellement interdits [3]

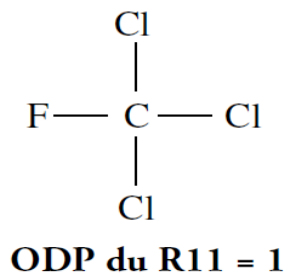


Figure III.4: Représentation de la molécule R11 [3]

III.4.2. GWP (Potentiel de réchauffement global)

Le potentiel de réchauffement global est une mesure de la quantité d'une masse donnée de gaz à effet de serre estimée contribuant au réchauffement climatique [22]. Le fluide qui sert de référence au GWP est le CO₂ dont la valeur est égale à 1. L'abréviation GWP est souvent associée à l'indice **100 (GWP100)**, cela veut dire que l'impact du réchauffement couvre une période de 100 ans. Cet indice caractérise l'action d'un composé chimique sur l'effet de serre [3]

III.4.3. TEWI (Impact de réchauffement total équivalent) :

Le TEWI est un concept conçu pour exploiter le réchauffement global pendant la durée de vie d'un système de réfrigération, par exemple l'utilisant un fluide frigorigène déterminé en tenant compte de l'effet direct dû aux émissions de fluides frigorigènes et à l'effet indirect dû à l'énergie nécessaire au fonctionnement du système. Pour plus information, est donnée par la formule :

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

Où :

GWP : Potentiel de Réchauffement Global ;

L : émissions annuelles de fluide en kg ;

n : la durée de vie du système en années ;

m : charge de réfrigérant en kg ;

C : facteur récupération/recyclage compris entre 0 et 1 ;

E : consommation énergétique annuelle en kWh ;

β : Émissions de CO₂ en kg/kWh. [1]

III.5. Les qualités d'un bon fluide frigorigène

La consommation d'énergie électrique des installations frigorifiques industrielles représente une part importante des frais de fonctionnement, la recherche de fluides frigorigènes à effet frigorifique maximal est donc évidente.

$$\text{Effet frigorigère ou COP} = \frac{\text{puissance frigorigère}}{\text{puissance électrique absorbée}}$$

Il importe donc que 1 kWh d'énergie électrique consommée permette d'évacuer le maximum d'énergie thermique (en kWh) du médium à refroidir.

Le COP peut varier de 0,6 à 3 dans les applications classiques en froid industriel, voir au-delà ou en de ça dans les applications particulières.

Le coût des installations frigorigères industrielles est important, les compresseurs en représentent une part significative.

La recherche de fluides frigorigères permettant de faibles cylindrées est donc évidente. Cette faible cylindrée est possible à partir de fluide présentant une forte production frigorigère volumétrique (en kilojoules par mètre cube aspiré).

La production frigorigère volumétrique dépend des deux facteurs suivants :

- Forte chaleur latente d'ébullition (kJ/kg) ;
- Faible volume massique des vapeurs à l'aspiration (m³/kg).

$$\begin{aligned} \text{Production frigorigère volumétrique} &= \\ \frac{\text{Chaleur latente d'ébullition}}{\text{Volume spécifique des vapeurs à l'aspiration}} &= \frac{\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Les deux caractéristiques ci-dessus sont prioritairement prises en compte lors du choix d'un fluide frigorigère. [3]

Autres qualités demandées à un fluide frigorigère

- Faible taux de compression.
- Basse pression supérieure à la pression atmosphérique en fonctionnement normal.
- Faible température de fin de compression (une température élevée n'est pas favorable à la stabilité chimique de l'huile et du fluide frigorigère).
- Miscibilité à l'huile. La miscibilité huile fluide frigorigère est indispensable pour assurer le retour de l'huile au compresseur. La sélection de l'huile est donc importante. Cette remarque vaut surtout pour les installations à alimentation sèche des évaporateurs.
- Prix compétitif.

- Bonne disponibilité.
- Faible toxicité.
- Recherche des fuites faciles.
- Faible volume massique du liquide (influence sur le prix des canalisations liquides).
- Faible influence sur le réchauffement climatique (GWP).

De très nombreuses autres qualités sont à prendre en compte, telles que l'influence sur l'ozone et l'effet de serre, l'influence sur les composants de l'installation, la non-inflammabilité, la non-explosibilité, l'absence d'action sur les denrées entreposées, etc. [3].

Chapitre IV
Bilan thermique

Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons au calcul des charges thermique de la chambre froide, qui nous permet de déterminer la puissance frigorifique de la machine. Cette puissance représente la quantité de froid nécessaire au refroidissement des denrées.

IV.1. Charge thermique de la chambre froide

Les charges thermiques se répartissent en deux grandes catégories :

- Charges thermiques externes
- Charges thermiques internes

IV.1.1. Charge thermique externe

Elles comprennent :

- Les charges dues aux apports de chaleur par transmission à travers l'enveloppe de la chambre froide (parois verticales, plancher bas, plancher haut)
- Les charges dues au renouvellement d'air [25]

Charge due aux apports de chaleur par transmission à travers les parois :

L'écart de température existante entre le milieu à refroidir et le milieu ambiant provoque la transmission de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre, la quantité de chaleur pénétrante est donnée par la relation suivante :

$$Q_p = k \cdot s \cdot \Delta T \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (\text{IV.1})$$

Q_p : charge thermique par transmission à travers les parois [kJ]

k : coefficient d'échange thermique des parois [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

ΔT : différence de température entre le milieu extérieur et intérieur [$^{\circ}\text{C}$]

t : le temps [s]

➤ **Le coefficient d'échange thermique K est donné par la relation :**

$$k = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_i + \sum \frac{e}{\lambda} + R_e} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

K : Coefficient de transmission thermique [W/m². °C]

R_i : Résistance superficielle interne de la paroi [m². °C/W]

R_e : Résistance superficielle externe de la paroi [m². °C/W]

h_i : Coefficient de transfert de chaleur par convection intérieur [W/m². °C]

h_e : Coefficient de transfert de chaleur par convection extérieur [W/m². °C]

e : épaisseur de la paroi d'isolant [m]

λ : conductivités thermiques de La paroi en [W/m. °C]

$\sum \frac{e}{\lambda}$: Somme des résistances thermiques des différentes couches des matériaux constituant la paroi.

➤ **Charge thermique par renouvellement d'air :**

Il est indispensable de renouveler l'air de la chambre froide, l'air vicié est évacué par un ventilateur [10].

La charge thermique par renouvellement d'air a pour valeur :

$$Q_{r,a} = m_{a,e} \cdot (h_e^s - h_i^s) \quad (\text{IV.3})$$

m_{a,e} : masse d'air entrante [kg d'air sec]

h_e^s : l'enthalpie de l'air extérieur [kJ/kg d'air sec]

h_i^s : l'enthalpie de l'air intérieur [kJ/kg d'air sec]

La masse d'air entrante est donné par la relation suivante :

$$m_{a,e} = \frac{V_{a,e}}{V_i^s} = nr \frac{V_{cf}}{V_i^s} \quad (\text{IV.4})$$

$V_{a,e}$: Volume de l'air entrant [m³]

V_i^s : Volume spécifique intérieur m³/kg

V_{cf} : Volume de la chambre froide [m³]

nr : nombre de renouvellement d'air

Le nombre de renouvellement d'air correspond au nombre de fois que le volume de la chambre est renouvelé en une journée. Il se calcul par la formule suivante : [25]

$$nr = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}} \quad (\text{IV.5})$$

IV.1.2. Charge thermique interne

Elles sont classées en deux catégories ; charges indépendantes des denrées entreposées, charge thermique dépendante des denrées entreposées.

A. Les charges indépendantes des produits entreposés

- Charge thermique due à l'éclairage.
- Charge thermique due aux personnels
- Charge thermique due aux moteurs des ventilateurs.
- **Les charges dépendantes des produits entreposés**

Charges thermiques due aux produits entrants.

- **Charge thermique indépendante des denrées entreposées**
 - **Charge thermique due à l'éclairage**

Les luminaires des chambres froides classiques doivent pouvoir résister au froid, l'humidité, être étanche à l'eau et être protégé du contact avec tous objets.

La charge thermique due à l'éclairage est donnée par la relation qui suit :

$$Q_{éc} = n_{éc} \cdot p \cdot t \cdot 10^{-3} \tag{IV.6}$$

$Q_{éc}$: Apport de chaleur due à l'éclairage [kJ]

$n_{éc}$: Nombre d'éclairage

p : La puissance [W]

t : Le temps de fonctionnement [s]

- **Charge thermique due aux personnels :**

La charge thermique due aux personnels est donnée par la relation qui suit :

$$Q_{per} = n_{per} \cdot q_{per} \cdot 10^{-3} \tag{IV.7}$$

Q_{per} : Charge thermique due aux personnes [kJ]

n_{per} : Nombre de personne

q_{per} : Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne [W]

t : Temps de travail [s]

Le métabolisme d'une personne en activité dans une chambre froide est lié à la température intérieure de la chambre froide, il est donné dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne en activités moyenne dans une chambre froide .[25]

| Température de la chambre froide [°C] | Quantité de chaleur dégagée par personne [W] |
|---------------------------------------|--|
| 20 | 180 |
| 15 | 200 |
| 10 | 210 |
| 5 | 240 |

| | |
|-----|-----|
| 0 | 270 |
| -5 | 300 |
| -10 | 330 |
| -15 | 360 |
| -20 | 390 |
| -25 | 420 |

• **Charge thermique due au moteur du ventilateur :**

Dans les chambres froides modernes on utilise toujours des échangeurs de chaleur équipés d'un ou plusieurs ventilateurs ce qui permet d'assurer un brassage et circulation efficace de l'air, chaque ventilateur est entraîné par un moteur électrique.

La charge due aux moteurs de ventilation est donnée par la formule suivante :

$$Q_v = n_v \cdot p_v \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (\text{IV.8})$$

Q_v : Apport de chaleur par ventilation [kJ]

n_v : Nombre des moteurs de ventilateur

P_v : Puissance absorbée par les moteurs de ventilateur en [W]

t : Temps de fonctionnement des moteurs en [s]

➤ **Charge thermique dépendante des produits entreposés**

• **Charge due aux produits entrants**

Les denrées introduites dans la chambre froide ont toujours une température supérieure à celle de la chambre cette dernière dégagent une quantité de chaleur donnée par la relation :

$$Q_d = m_d \cdot c_d (\theta_i - \theta_f) \quad (\text{IV.9})$$

Q_d : Apport de chaleur des denrées [kJ]

m_d : La masse des denrées introduites dans la chambre par jour [kg]

C_d : Capacité thermique massique des denrées [kJ/kg. °C]

θ_i : Température initiale des denrées (avant refroidissement)

θ_f : Température final des denrées égale à la température de la chambre froide [°C]

IV.1.3. Somme des charges thermiques de la chambre froide

La charge thermique de la chambre froide s'obtient par l'addition des différentes charges thermiques internes et externes :

$$Q_{CF} = Q_{ptot} + Q_{r,a} + Q_d + Q_{per} + Q_{éc} + Q_v \quad (IV.8)$$

IV.1.4. Charge thermique non chiffrable

5% à 10% du bilan provisoire (somme des apports précédents) selon le niveau d'incertitude a intégré à Q_{CF} calculé ci-dessus, on la note Q_{sup} [26]

$$Q_{sup} = 0,05 \text{ à } 0,1 Q_{CF} \text{ [kJ]} \quad (IV.11)$$

IV.1.5. Charge thermique global de la chambre froide

$$Q_T = Q_{CF} + Q_{sup} \text{ [kJ]}$$

IV.1.6. Puissance frigorifique

$$\Phi_0 = \frac{Q_T}{t_{fc}}$$

Φ_0 : Puissance frigorifique nécessaire en [kW].

Q_T : Charges thermiques global de la chambre froide.

t_{fc} : temp de fonctionnement des compresseurs en s.

IV.2. Calcul des charges thermiques

IV.2.1. Calcul pour la chambre froide à température de -15°C

C'est une chambre destinée à conserver du concentrés d'Orange à une température avoisinante de -15 °C.

IV.2.1.1. Données de calculs

- **Dimensions :**
 - Longueur : $L = 30 \text{ m}$
 - Largeur : $l = 12 \text{ m}$
 - Hauteur : $H = 8 \text{ m}$
 - Surface sol : $S = 360\text{m}^2$
 - Volume : 2880m^3
- **Conditions thermiques :**
 - Température du sol : $T_s = +15 \text{ C}^\circ$
 - Température interne de la chambre négative : $T_{in} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Humidité relative de la chambre négative : $\Psi = 95 \%$
 - Température extérieure de la ville d'Akbou = $+45\text{C}^\circ$
 - Humidité relative extérieur $\Psi = 50\%$

IV.2.1.2. Calcul des charges thermiques externes

Les apports thermiques à travers les parois :

Tableau IV.2: Conductivité thermique et épaisseur de chaque matériau utilisé

| Matériaux | Epaisseur e (m) | Conductivité λ (w/m.°C) |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Panneau sandwich (polyuréthane) | 0,1 | 0,022 |
| Break (Parpaing) | 0,2 | 0,95 |
| Béton | 0,1 | 1,75 |
| Le Liège | 0,01 | 0.044 |

Tableau IV.3: Résistance thermique superficiel des parois verticales de la chambre froide [7]

| Coté externe de la paroi | $\frac{1}{h_e}$ [m ² .°C/W] | Coté interne de la paroi | $\frac{1}{h_i}$ [m ² .°C/W] |
|---|--|---|--|
| Cas ou la paroi en contact avec l'air extérieur | 0,03 | Cas d'une chambre froide avec ventilation mécanique | 0,06 |
| Cas ou la paroi en contact avec un autre local | 0,12 | Cas d'une chambre froide avec ventilation naturelle | 0,12 |

On commence par déterminer le coefficient de transmission k des parois verticales :

- Pour les parois verticales 1, 2, 3 on a :

$$\frac{1}{h_e} = 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} \text{ (Mur en contact avec un autre local)}$$

$$\frac{1}{h_i} = 0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} \text{ (Ventilation mécanique)}$$

$$K = \frac{1}{0,06 + \frac{0,1}{0,022} + 0,12} = 0,2116 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

- Parois Est dont les dimensions sont : L= 12 m ; H=8m

$$Q_{\text{pest}} = K \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{pest}} = 0,2116 (8 \cdot 12) (45 + 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{pest}} = 105305,70 \text{ kJ}$$

- Parois Ouest dont les dimensions sont : L=12m ; H=8m

Le coefficient de transmission k change.

$$\frac{1}{h_e} = 0,03 \text{m}^2 \cdot \text{°C/W} \text{ (Mur en contact avec l'air extérieur)}$$

$$k = \frac{1}{0,03 + \frac{0,1}{0,022} + 0,12} = 0,2130 \text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$Q_{\text{pouest}} = 0,2130 (8 \cdot 12) (45 + 15) 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{pouest}} = 106002,43 \text{ kJ}$$

- Parois Sud dont les dimensions sont : L=30m ; H=8 m

$$Q_{\text{psud}} = 0,2116 (30 \cdot 8) (45 + 15) 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{psud}} = 263264,26 \text{ kJ}$$

- Parois Nord dont les dimensions sont : L=30m H=8m

$$Q_{\text{pnord}} = 0,2116 (30 \cdot 8) (45 + 15) 86400 \cdot 10^{-10}$$

$$Q_{\text{pnord}} = 263264,26 \text{ kJ}$$

- Pour les parois horizontales :

Tableau IV.4: Resistance superficielle des parois horizontales [26]

| Parois | $R_i = \frac{1}{h_i} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$ | $R_e = \frac{1}{h_e} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$ |
|-----------------------------|---|---|
| Parois avec flux ascendant | 0,09 | 0,05 |
| Parois avec flux descendant | 0,15 | 0,05 |

- A travers le plafond :

$$\frac{1}{h_i} = 0,09 \text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

$$\frac{1}{h_e} = 0,05 \text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

$$k = \frac{1}{0.09 + \frac{0.1}{0.022} + \frac{0.1}{1.75} + 0,05} = 0,2108 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$Q_{p,plf} = 0,2108(30.12)(45 + 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{p,plf} = 393403,39 \text{ kJ}$$

- A travers le sol :

$$\frac{1}{h_i} = 0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

$$\frac{1}{h_e} = 0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

$$k = \frac{1}{0.15 + \frac{0.1}{1.75} + \frac{0.1}{0.044} + 0,03} = 0,3984 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$Q_{p,sol} = 0,3984(12.30)(45 - 15) \cdot 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{p,sol} = 371755,008 \text{ kJ}$$

Tableau IV.5: Quantité de chaleur totale échangée à travers les parois (Q_{ptot})

| Parois | $Q_p = K \cdot S \cdot \Delta T \cdot 10^{-3} [\text{KJ}]$ |
|-------------|--|
| Paroi est | 105305,70 |
| Paroi ouest | 106002,43 |
| Paroi sud | 263264,26 |
| Paroi nord | 263264,26 |
| Plafond | 393403,39 |
| Sol | 371755,008 |
| Q_{ptot} | 1502995,048 |

➤ **Charge thermique par renouvellement d'air :**

• **A l'intérieur de la chambre froide :**

Pour une température de $T = -15\text{ °C}$ avec une humidité relative de $\Psi = 90\%$ le diagramme de l'air humide nous donne :

$$h_i^s = -12 \text{ kJ/kg air sec}$$

$$V_i^s = 0,73 \text{ m}^3/\text{kg air sec}$$

• **A l'extérieur de la chambre froide :**

Pour une température de $T = 45\text{ °C}$ avec une humidité relative de $\Psi = 50\%$ le diagramme de l'air humide nous donne :

$$h_e^s = 122 \text{ kJ/kg air sec.}$$

$$m_{a,s} = \frac{V_{a,e}}{V_i^s} = \frac{nr \cdot V_{cf}}{V_i^s}$$

$$nr = \frac{70}{\sqrt{V_{CF}}} = \frac{70}{\sqrt{2880}} = 1,30$$

$$m_{a,s} = \frac{2880 \cdot 1,30}{0,73} = 5128,77 \text{ Kg . air . sec}$$

$$Q_{r,a} = 5128,77(122 + 12)$$

$$Q_{r,a} = 687255,18 \text{ kJ}$$

IV.2.1.3. Calcul des charges thermiques internes

• **Charge thermique due à l'éclairage :**

Le nombre d'éclairage est de 2 projecteurs d'une puissance de 150W chacune, pour une durée de fonctionnement de 24h.

$$Q_{éc} = n_{éc} \cdot p_{éc} \cdot t \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{éc} = 2 \cdot 150 \cdot 86400 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{éc} = 25920 \text{ kJ}$$

• **Charge thermique due au personnel :**

Le nombre de personnes qui travaillent dans la chambre froide est 2 travailleurs, leur travail peut être classé comme un travail moyen. Pour une température de -15°C , le tableau (IV.1) nous donne la chaleur dégagée par chaque travailleur : $P_{\text{per}} = 360\text{W/personne}$

$$Q_{\text{per}} = n_{\text{per}} \cdot q_{\text{per}} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{per}} = 2.360.86400.10^{-3}$$

$$Q_{\text{per}} = 62208\text{kJ}$$

• **Charges thermiques des denrées entrantes :**

$$Q_d = m_d \cdot c_d \cdot (\theta_i + \theta_f)$$

La masse des denrées introduites chaque jour : $m_d = 100000\text{kg/jour}$. La Température initiale des denrées (avant refroidissement) : $\theta_i = 0^{\circ}\text{C}$. La Température finale des denrées égale à la température de la chambre. La Chaleur massique spécifique : $c_d = 3,77\text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$

$$Q_d = 100000.3,77.(0 + 15)$$

$$Q_d = 5655000\text{ kJ}$$

• **Charge du au moteur des ventilateurs**

$$Q_v = n_v \cdot P_v \cdot t \cdot 10^{-3}[\text{kJ}]$$

La chambre froide contient un évaporateur qui contient 4 moteurs de ventilation d'une puissance de (1500W) chacun.

$$Q_v = 4.1500.86400.10^{-3}$$

$$Q_v = 518400\text{ kJ}$$

IV.2.2. Somme des charges thermiques de la chambre froide

$$Q_{CF} = Q_v + Q_{éc} + Q_{per} + Q_{r,a} + Q_d + Q_{ptot}$$

$$Q_{CF} = 8451778,228\text{kJ}$$

IV.2.3. Charge thermique non chiffrable

$$Q_{sup} = 0,1 \cdot Q_{CF}$$

$$Q_{sup} = 845177,82 \text{ kJ}$$

IV.2.4. Charge totale

$$Q_T = Q_{sup} + Q_{CF}$$

$$Q_T = 9296956,005 \text{ kJ}$$

IV.2.5. Calcul de la puissance frigorifique correspondante

$$\Phi_0 = \frac{Q_T}{t_{cf}} = \frac{9296956,005}{86400}$$

$$\Phi_0 = 107,60\text{kW}$$

Conclusions

Dans ce chapitre, on a déterminé la puissance frigorifique qu'on doit extraire de la chambre froide, et qui va nous permettre de déterminer le débit massique du fluide frigorigène nécessaire à l'extraction de cette puissance frigorifique.

Chapitre V

Analyse thermodynamique

Introduction

D'après le calcul des charges thermiques nous avons trouvé que la puissance qu'on doit extraire de la chambre froide est de $\Phi_0 = 107,60\text{kW}$ et qui va nous permettre de déterminer le débit massique nécessaire à la chambre froide.

V.1. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R404a

V.1.1. Présentation de l'installation

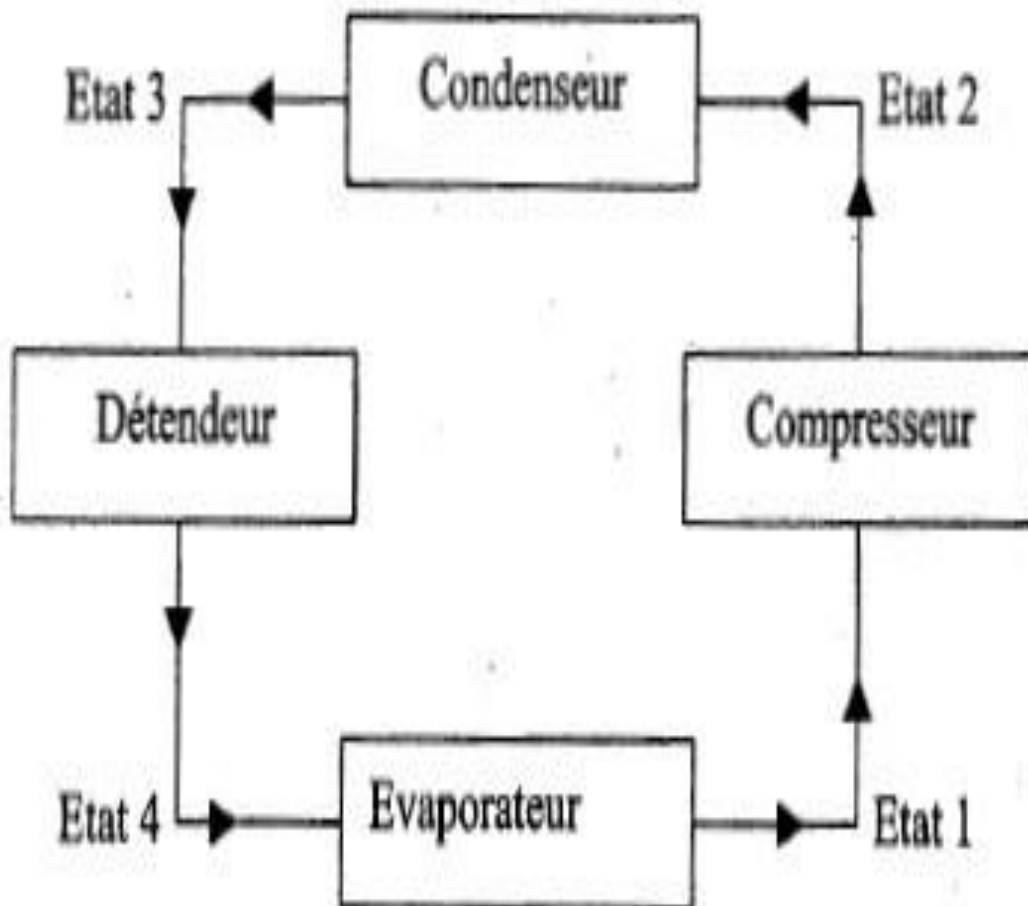


Figure V.1: Schéma de l'installation frigorifique

V.1.2. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique

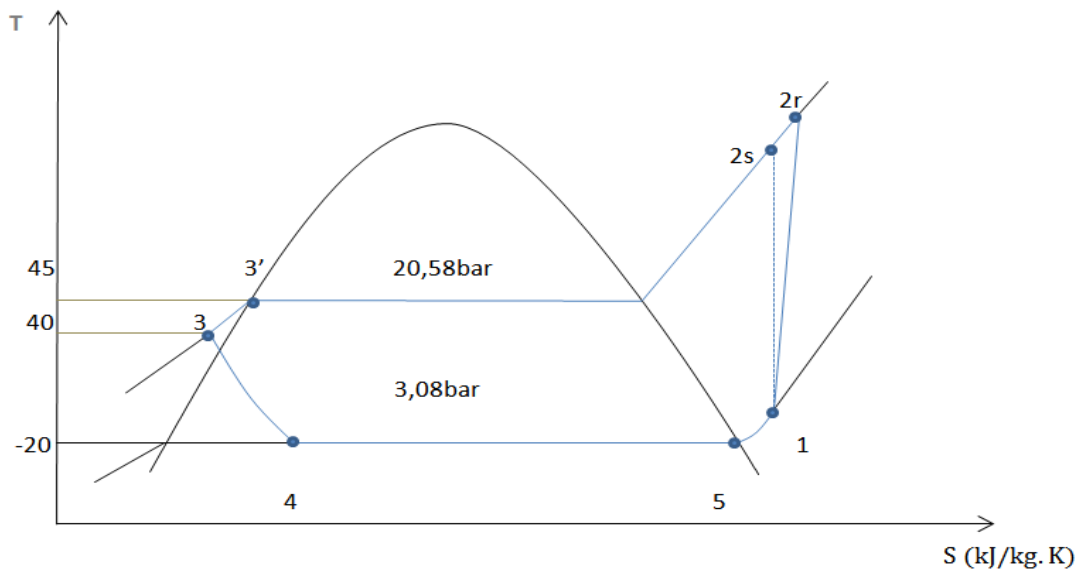


Figure V.2: Diagramme entropique de l'installation frigorifique

- **Entre 1 et 2** : compression de la vapeur permet d'élever sa pression (de basse pression vers haute pression).
- **Entre 2 et 3'** : la vapeur se refroidit (désurchauffe), puis elle change progressivement d'état pour être complètement liquide.
- **Entre 3' et 3** : sous refroidissement de 5°C du fluide frigorigène liquide.
- **Entre 3 et 4** : le fluide frigorigène se vaporise partiellement, ce qui abaisse sa température.
- **Entre 4 et 5** : évaporation du fluide frigorigène liquide qui devient de la vapeur de à basse pression.
- **Entre 5 et 1** : surchauffe de 10°C de la vapeur à basse pression.

V.1.3. Régime de fonctionnement

- HP= 20,58 bar $\rightarrow \theta_k = 45^\circ\text{C}$
- BP= 03,08 bar $\rightarrow \theta_0 = -20^\circ\text{C}$
- La surchauffe dans l'évaporateur est négligeable.
- La surchauffe à l'entrée du compresseur est de 10°C.
- Le sous-refroidissement dans le condenseur est négligeable.
- Le sous-refroidissement à l'entrée du détendeur est de 5°C.

V.1.4. Calcule des différents points du cycle

Tableau V.1: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle

| Points | Température [°C] | Pression [bar] | Enthalpies [kJ/kg] | Entropie [kJ/kg K] |
|----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | -10 | 3,08 | 364,73 | 1,65476 |
| 2 _r | - | 20,58 | 410,049 | 1,66956 |
| 2 _s | - | 20,58 | 403,2514 | 1,65476 |
| 3' | 45 | 20,58 | 273,2 | 1,2421 |
| 3 | - | 20,58 | 264,028 | 1,2181 |
| 4 | -20 | 3,08 | 264,028 | - |
| 5 | -20 | 3,08 | 356,5 | 1,6245 |

- Calcul de h_1 et s_1 :

$$3 \text{ bar} \rightarrow 364,8 \text{ kJ/kg}$$

$$3,08 \text{ bar} \rightarrow h_1$$

$$3,1 \text{ bar} \rightarrow 364,7 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation linéaire a $p = 3,08 \text{ bar}$

$$h_1 = 364,8 + \frac{364,7 - 364,8}{3,1 - 3} \cdot (3,08 - 3) = 364,73 \text{ kJ/kg}$$

$$3 \text{ bar} \rightarrow 1,6570 \text{ kJ/kg K}$$

$$3,08 \text{ bar} \rightarrow s_1$$

$$3,1 \text{ bar} \rightarrow 1,6538 \text{ KJ/kg k}$$

$$s_1 = 1,6570 + \frac{1,6538 - 1,6570}{3,1 - 3} \cdot (3,08 - 3) = 1,65476 \text{ KJ/kg k}$$

- Calcul de h_{2s} :

Pour $\theta = 55^\circ\text{C}$

$$h_{x1} = 399,1 + \frac{395,1 + 399,1}{22 - 20} \cdot (20,58 - 20) = 397,94 \text{ KJ/kg}$$

Pour $\theta = 60^\circ\text{C}$

$$h_{x2} = 405 + \frac{401,4 - 405}{22} \cdot (20,58 - 20) = 403,956 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 397,94 + \frac{403,956 - 397,94}{1,6566 - 1,6388} \cdot (1,65476 - 1,6388)$$

$$h_{2s} = 403,2514 \text{ KJ/kg}$$

- Calcul de h_{2r} :

Rendement isentropique :

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} = 0,85$$

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

$$h_{2r} = 410,049 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_3 :

Pour h_3 , on a $\theta = 45^\circ\text{C}$ (table)

$$h_3 = 273,2 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_3 :

On a un sous refroidissement de 5°C , la température sera 40°C .

$$h_3 \approx h_{\text{sat}} + v_{\text{sat}}(p_3 - p_{\text{sat}})$$

$$h_3 \approx 263,8 + [0,001(20,58 \cdot 10^5 + 18,252 \cdot 10^5) \cdot 10^{-3}]$$

$$h_3 \approx 267,68 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_4 :

On a une détente isenthalpique donc :

$$h_4 = h_3 = 267,68 \text{ kJ/kg} :$$

V.1.5. Etude énergétique de l'installation frigorifique

L'installation est composée de deux compresseur monter en parallèle.

$$p'_{\text{thc}} = \frac{p_{\text{thc}}}{2} \quad (\text{V.1})$$

$$p'_c = \frac{p_c}{2} \quad (\text{V.2})$$

p'_{thc} : puissance théorique d'un seul compresseur [kW]

p'_c : puissance d'un seul compresseur [kW]

- Calcul du débit du fluide frigorigène R404A (q_m)

$$q_m = \frac{\Phi}{Q_0}$$

Φ : puissance frigorifique.

Q_0 : production frigorifique massique a l'évaporateur.

$$Q_0 = h_5 - h_4 = 356,5 - 264,028$$

$$Q_0 = 92,472 \text{ kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{107,60}{92,472} = 1,16 \text{ kg/s}$$

- Puissance théorique du compresseur :

$$p_{\text{thc}} = q_m (h_{2s} - h_1)$$

$$p_{\text{thc}} = 1,16 (403,2514 - 364,73)$$

$$p_{\text{thc}} = 44,68 \text{ kW}$$

$$p'_{\text{thc}} = 22,34 \text{ kW} \quad (\text{V.1})$$

- Puissance réelle du compresseur :

$$p_c = q_m (h_2 - h_1)$$

$$p_c = 1,16 (410,029 - 364,73)$$

$$p_c = 52,57 \text{ kW}$$

$$p'_c = 26,285 \text{ kW} \quad (\text{V.2})$$

- Puissance frigorifique du condenseur :

$$p_{cd} = q_m \cdot (h_2 - h_3)$$

$$p_{cd} = 1,16(410,049 - 264,028)$$

$$p_{cd} = 169,38 \text{ kW}$$

- Puissance frigorifique à l'évaporateur :

$$p_{ev} = q_m(h_5 - h_4)$$

$$p_{ev} = 1,16(356,5 - 264,028)$$

$$p_{ev} = 107,26 \text{ kW}$$

- Coefficient de performance :

$$\text{COP} = \frac{p_{ev}}{p_c}$$

$$\text{COP} = 2,04$$

V.2. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R134a

V.2.1. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique

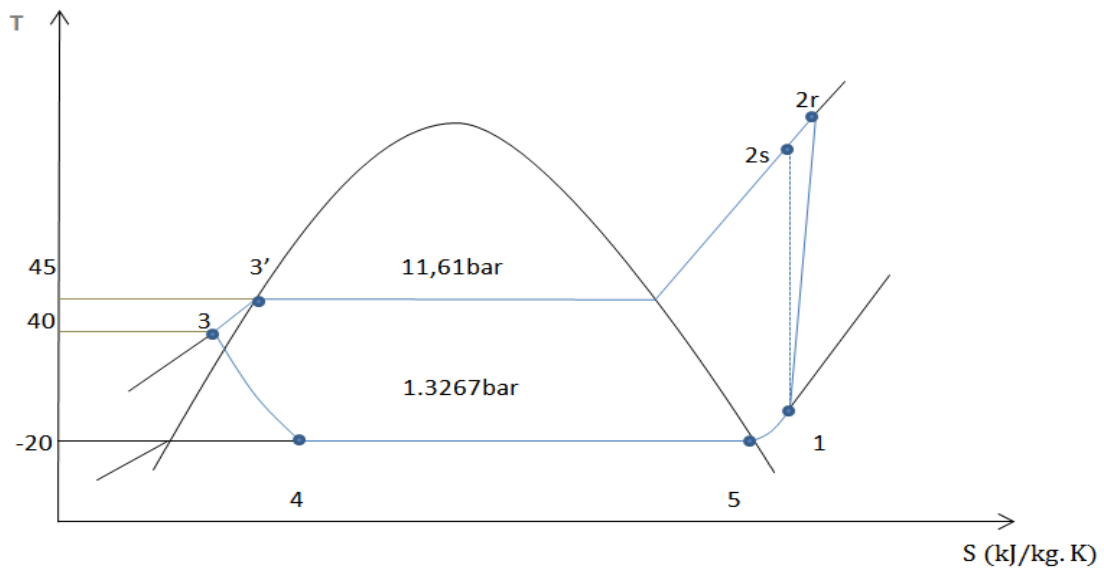


Figure V.3: Diagramme entropique de l'installation frigorifique

V.2.2. Régime de fonctionnement

- HP = 11,61 bar $\rightarrow \theta_k = 45^\circ\text{C}$.
- BP = 1,3267 bar $\rightarrow \theta_0 = -20^\circ\text{C}$.
- La surchauffe dans l'évaporateur est négligeable.
- La surchauffe à l'entrée du compresseur est de 10°C .
- Le sous-refroidissement dans le condenseur est négligeable.
- Le sous-refroidissement à l'entrée du détendeur est de 5°C .

V.2.3. Calcule des différents points du cycle

Tableau V.2: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle.

| Points | Température [°C] | Pression [bar] | Enthalpies [kJ/kg] | Entropie [kJ/Kg K] |
|----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | -10 | 1,3267 | 394,99 | 1,7705 |
| 2 _r | - | 11,61 | 446,940 | - |
| 2 _s | - | 11,61 | 439,148 | 1,7705 |

| | | | | |
|----|-----|--------|--------|--------|
| 3' | 45 | 11,61 | 264,2 | - |
| 3 | - | 11,61 | 258,56 | - |
| 4 | -20 | 1,3267 | 258,56 | - |
| 5 | -20 | 1,3267 | 386,8 | 1,7422 |

- Calcul de h_1 et s_1 :

$$1,3 \text{ bar} \rightarrow 395 \text{ kJ/kg}$$

$$1,3267 \text{ bar} \rightarrow h_1$$

$$1,4 \text{ bar} \rightarrow 394,99 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation linéaire :

$$h_1 = 395 + \frac{394,7 - 395}{1,4 - 1,3} \cdot (1,3267 - 1,3) = 394,99 \text{ kJ/kg}$$

$$1,3 \text{ bar} \rightarrow 1,7756 \text{ kJ/kg k}$$

$$1,3267 \text{ bar} \rightarrow s_1$$

$$1,4 \text{ bar} \rightarrow 1,7687 \text{ kJ/kg k}$$

$$s_1 = 1,7687 + \frac{1,7756 - 1,7687}{1,4 - 1,3} \cdot (1,3267 - 1,3) = 1,7705 \text{ kJ/kg k}$$

- Calcul de h_{2s} :

Pour $\theta = 60^\circ\text{C}$

$$h_{x1} = 440 + \frac{438,1 + 440}{12 - 11} \cdot (11,61 - 11) = 438,841 \text{ kJ/kg}$$

pour $\theta = 65^\circ\text{C}$

$$h_{x2} = 445,4 + \frac{443,6 - 445,4}{12 - 11} \cdot (11,61 - 11) = 444,302 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 438,841 + \frac{444,302 - 438,841}{1,7856 - 1,7696} \cdot (1,7705 - 1,7696) = 439,148 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_{2r} :

Rendement isentropique :

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} = 0,85$$

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

$$h_{2r} = 446,940 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de $h_{3'}$:

Pour $h_{3'}$ on a $\Theta = 45^\circ\text{C}$ (table)

$$h_{3'} = 264,2 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_3 :

On a un sous refroidissement de 5°C , la température sera 40°C .

$$h_3 \approx h_{\text{sat}} + v_{\text{sat}} (p_3 - p_{\text{sat}})$$

$$h_3 \approx 256,6 + [0,0009 \cdot (11,61 \cdot 10^5 + 10,18 \cdot 10^5) \cdot 10^{-3}]$$

$$h_3 \approx 258,56 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_4 :

On a une détente isenthalpique donc :

$$h_4 = h_3 = 258,56 \text{ kJ/kg}$$

V.2.4. Etude énergétique de l'installation frigorifique

- Calcul du débit du fluide frigorigène R134a :

$$q_m = \frac{\Phi}{Q_0}$$

$$Q_0 = h_5 - h_4 = 386,8 - 258,56$$

$$Q_0 = 128,24 \text{ kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{107,60}{128,24} = 0,84 \text{ kg/s}$$

- Puissance théorique du compresseur :

$$p_{\text{thc}} = q_m (h_{2s} - h_1)$$

$$p_{\text{thc}} = 0,84 (439,148 - 394,99)$$

$$p_{\text{thc}} = 37,09 \text{ kW}$$

$$p'_{\text{thc}} = 18,545 \text{ kW} \quad (\text{V.1})$$

- Puissance réelle du compresseur :

$$p_c = q_m (h_2 - h_1)$$

$$p_c = 0,84 (446,940 - 394,99)$$

$$p_c = 43,64 \text{ kW}$$

$$p'_c = 21,82 \text{ kW} \quad (\text{V.2})$$

- Puissance frigorifique du condenseur :

$$p_{cd} = q_m(h_2 - h_3)$$

$$p_{cd} = 0,84(446,940 - 258,56)$$

$$p_{cd} = 43,64\text{kW}$$

- Puissance frigorifique a l'évaporateur :

$$p_{ev} = q_m(h_5 - h_4)$$

$$p_{ev} = 0,84(386,8 - 258,56)$$

$$p_{ev} = 107,72\text{kW}$$

- Calcul du coefficient de performance (COP)

$$\text{COP} = \frac{p_{ev}}{p_c}$$

$$\text{COP} = 2,47$$

V.3. Analyse thermodynamique de l'installation frigorifique avec le R717

V.3.1. Cycle thermodynamique de l'installation sur le diagramme entropique

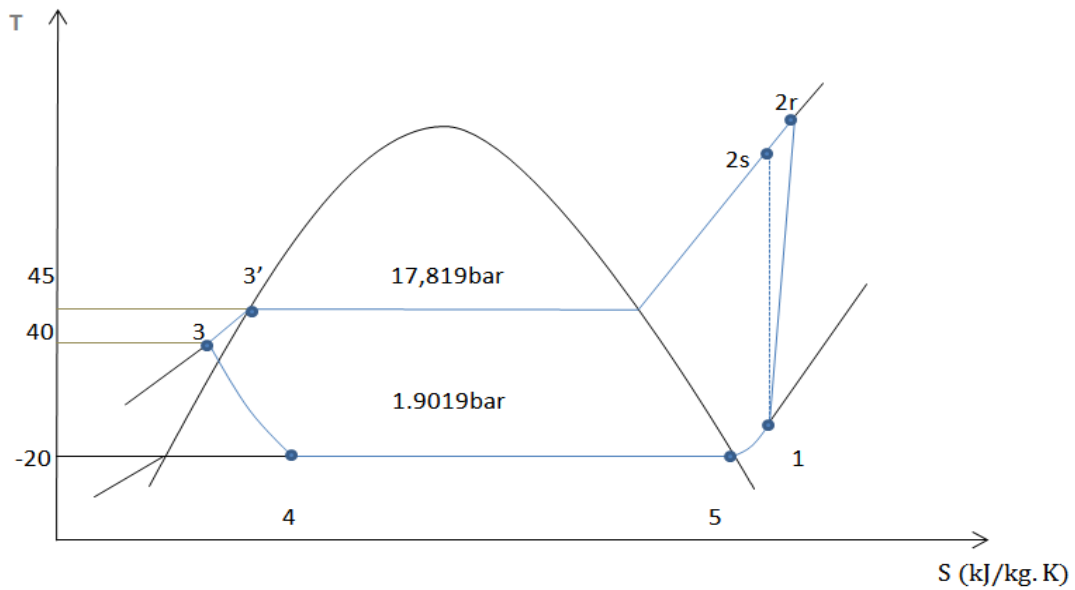


Figure V.4: Diagramme entropique de l'installation frigorifique.

V.3.2. Régime de fonctionnement

- HP = 17,819 bar → $\theta_k = 45^\circ\text{C}$.
- BP = 1,9019 bar → $\theta_0 = -20^\circ\text{C}$.
- La surchauffe dans l'évaporateur est négligeable.
- La surchauffe à l'entrée du compresseur est de 10°C .
- Le sous-refroidissement dans le condenseur est négligeable.
- Le sous-refroidissement à l'entrée du détendeur est de 5°C .

V.3.3. Calcule des différents points du cycle

Tableau V.3: Coordonnées thermodynamiques de chaque point du cycle

| Points | Température (°C) | Pression (bar) | Enthalpie (kJ/kg) | Entropie (kJ/kg.K) |
|----------------|------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| 1 | -10 | 1,9019 | 1441,32 | 5,7086 |
| 2 _r | - | 17,819 | 1837,3788 | - |
| 2 _s | - | 17,819 | 1777,97 | 5,7086 |
| 3 | - | 17,819 | 371,740 | - |

| | | | | |
|----|-----|--------|---------|--------|
| 3' | 45 | 17,819 | 396,13 | - |
| 4 | -20 | 1,9019 | 371,35 | - |
| 5 | -20 | 1,9019 | 1417,79 | 5,6144 |

- Calcul de h_1 et s_1 :

$$1,5 \text{ bar} \rightarrow 1445,49 \text{ kJ/kg}$$

$$1,9019 \text{ bar} \rightarrow h_1$$

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

Par interpolation linéaire:

$$h_1 = 1445,49 + \frac{1440,31 - 1445,49}{2 - 1,5} \cdot (1,9019 - 1,5) = 1441,32 \text{ kJ/kg}$$

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

$$1,9019 \text{ bar} \rightarrow s_1$$

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

$$s_1 = 5,8338 + \frac{5,6781 - 5,8338}{2 - 1,5} \cdot (1,9019 - 1,5) = 5,7086 \text{ kJ/kg K}$$

- Calcul de h_{2s} :

Pour $\theta = 140^\circ\text{C}$

$$h_{x1} = 1747,72 + \frac{1742,88 + 1747,72}{18 - 16} \cdot (17,819 - 16) = 1743,32 \text{ kJ/kg}$$

Pour $\theta = 160^\circ\text{C}$

$$h_{x2} = 1798,45 + \frac{1794,23 - 1798,45}{18 - 16} \cdot (17,819 - 16) = 1794,61 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 1743,32 + \frac{1794,61 - 1743,32}{5,7475 - 5,6276} \cdot (5,7086 - 5,6276) = 1777,97 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_{2r} :

Rendement isentropique :

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} = 0,85$$

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

$$h_{2r} = 1837,3788 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de $h_{3'}$:

Pour $h_{3'}$, on a $\theta = 45^\circ C$ (table)

$$h_{3'} = 396,13 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_3 :

On a un sous refroidissement de $5^\circ C$, la température sera $40^\circ C$.

$$h_3 \approx h_{\text{sat}} + v_{\text{sat}} (p_3 - p_{\text{sat}})$$

$$h_3 \approx 371,35 + [0,00172 \cdot (17,819 \cdot 10^5 + 15,549 \cdot 10^5) \cdot 10^{-3}]$$

$$h_3 \approx 371,35 \text{ kJ/kg}$$

- Calcul de h_4 :

On a une détente isenthalpique donc :

$$h_4 = h_3 = 371,35 \text{ kJ/kg}$$

V.3.4. Etude énergétique de l'installation frigorifique

- Calcul du débit du fluide frigorigène R717

$$q_m = \frac{\Phi}{Q_0}$$

$$Q_0 = h_5 - h_4 = 1417,79 - 371,35$$

$$Q_0 = 1046,44 \text{ kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{107,60}{1046,44} = 0,1028 \text{ kg/s}$$

- Puissance théorique du compresseur :

$$p_{\text{thc}} = q_m (h_{2s} - h_1)$$

$$p_{\text{thc}} = 0,1028(1777,97 - 1441,32)$$

$$p_{\text{thc}} = 34,6076 \text{ kW}$$

$$p'_{\text{thc}} = 17,3038 \text{ kW} \quad (\text{V.1})$$

- Puissance réelle du compresseur :

$$p_c = q_m (h_2 - h_1)$$

$$p_c = 0,1028(1837,3788 - 1441,32)$$

$$p_c = 40,7148 \text{ kW}$$

$$p'_c = 20,3574 \text{ kW} \quad (\text{V.2})$$

- Puissance frigorifique du condenseur :

$$p_{\text{cd}} = q_m (h_2 - h_3)$$

$$p_{cd} = 0,1028(1837,3788 - 371,740)$$

$$p_{cd} = 150,6677\text{kW}$$

- Puissance frigorifique de l'évaporateur :

$$p_{ev} = q_m(h_5 - h_4)$$

$$p_{ev} = 0,1028(1417,79 - 371,35)$$

$$p_{ev} = 107,57\text{kW}$$

- Calcul du coefficient de performance (COP)

$$COP = \frac{p_{ev}}{p_c}$$

$$COP = \frac{107,56}{40,7138}$$

$$COP = 2,64$$

V.4. Comparaison entre le R404A, le R717 et le R134a

La comparaison se fera la base des performances thermodynamiques calculées et des critères de choix des fluides établies dans le troisième chapitre[3].

Tableau V.4: Tableau de performance comparatif pour le R404A, R134a, R717

| Propriétés et performances | R404A | R717 | R134a |
|---|-------|-------|-------|
| COP | 2,04 | 2,64 | 2,47 |
| Débit massique (kg/s) | 1,16 | 0,10 | 0,84 |
| Température critique (°C) | 72 | 132,3 | 101,1 |
| ODP | 0 | 0 | 0 |
| GWP | 3922 | 0 | 3985 |
| Température d'ébullition à pression atmosphérique (°C) | -46,2 | -33,3 | -26,1 |
| PRG₁₀₀ | 3900 | 0 | 1430 |

D'après la comparaison entre les trois fluides pour les divers paramètres retenus (COP, ODP, PRG, GWP, q_m et la température critique) on constate ce qui suit :

- Commençons par la température critique il apparait que l'écart entre température critique et la température d'ébullition du R717 est relativement élevé par rapport à celles des deux autres fluides, ce critère permet à l'installation du R717 de travailler plus efficacement.
- On constate aussi que pour les trois paramètres (ODP, GWP, PRG₁₀₀) le R717 s'avère être le plus respectueux pour l'environnement.
- L'installation à ammoniac a besoin d'un débit frigorifique très inférieur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce présent mémoire est de faire une étude comparative entre trois fluides frigorigènes et dont l'un d'entre eux (R404A) est le fluide avec lequel cette installation frigorifique fonctionne à Ifri, et cela dans le but de répondre à la problématique posée par l'entreprise.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés aux différentes charges thermiques de la chambre froide afin de déterminer le débit du R404A nécessaire afin de réaliser une analyse thermodynamique qui nous va nous permettre d'effectuer l'étude comparative avec le R134a et le R717, au cours de laquelle il ressort que le R717 est le plus adéquat en termes de performances énergétiques et environnementales.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

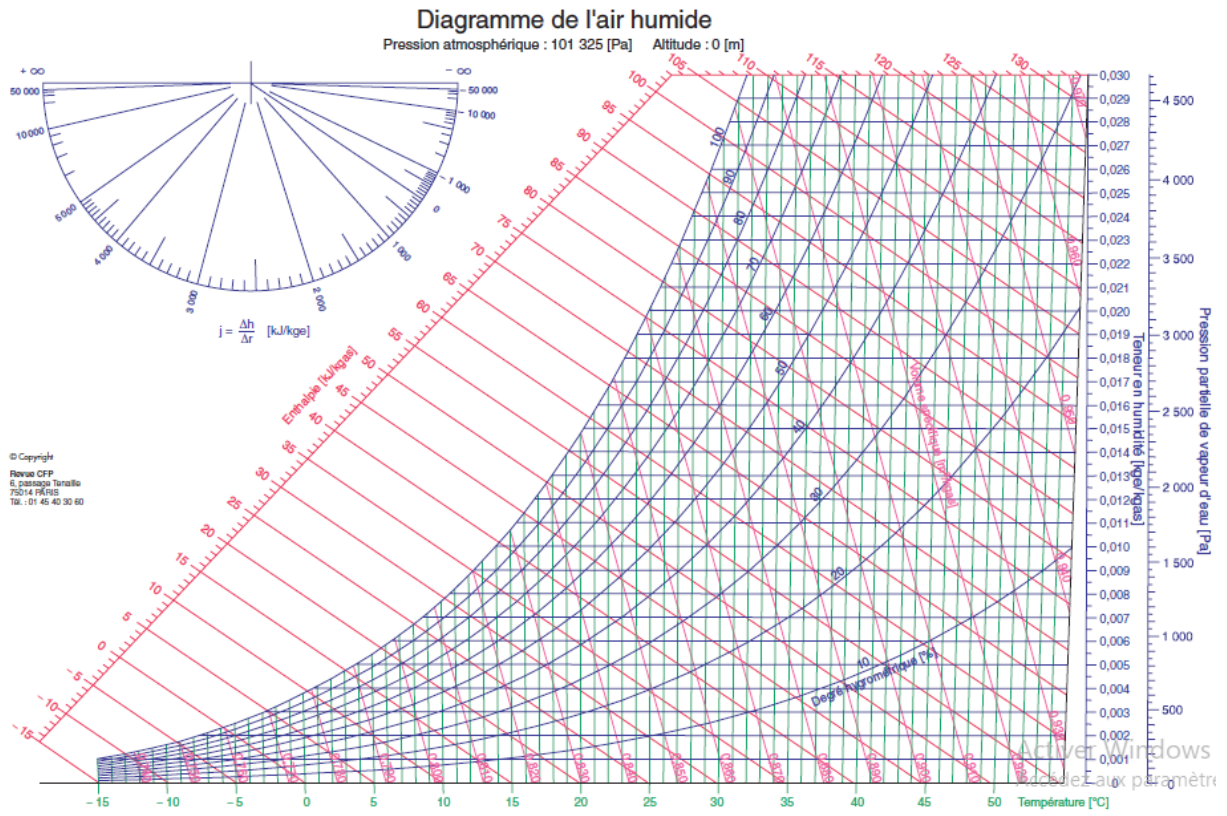
- [1]. Benhadid-Dib, Samira et Benzaoui, Ahmed. Refrigerants and their environmental impact Substitution of hydro chlorofluorocarbon HCFC and HFC hydro fluorocarbon. Search for an adequate refrigerant. Energy Procedia. 2012, 18, pp. 807-816.
- [2]. Meunier, Francis et Colbourne, Daniel. Les fluides frigorigènes Composés halogénés et fluides naturels. Paris : Dunod, 2014, 1, pp. 5-12.
- [3]. Desmons, Jean. Les fluides frigorigène utilisés en froide industriel . s.l. : Dunod, 2018, 2, pp. 4-10.
- [4]. Borel, Lucien. Thermodynamique et énergétique. s.l. : Press polytechnique romande, 1984.
- [5]. Boukredime, samir. Évaluation des performances d'une machine frigorifique hybride à absorption/ éjection. Annaba : s.n., 2016. Master.
- [6]. Noak, Henri, et al. Pratique des installations frigorifiques. 3. s.l. : PYC livres, 1999.
- [7]. Junjie, Gerard, Wang, Shaan et Gan, zal. Two phases flow in refrigeration systems. Springer. 2014.
- [8]. Démons, Jean. Aide- mémoire, froid industriel. Paris : Dunod, 2010.
- [9]. Abraham, L. L'ABC de la climatisation en 220 pages. 2. 2016.
- [10] Technique du froid CFmnLog. [En ligne] Juillet 2007.
- [11]. Froid Climatisation. blog spot.com. [En ligne] 25 Octobre 2013. [Citation : 22 Aout 2022.] <http://froidclime.blogspot.com> > 2012/02 > le-détendeur.
- [12]. Meunier, Francis, River, Paul et Terrier, Marie-France. Froid industriel série froide et génie climatique. 2. Paris : Dunod, 2005.
- [13]. Dossier climatisation-version 001-2013 sur le site web www.leguideits.fr.
- [14]. https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2015-03/les_d-tendeurs.pdf
- [15]. Manuel de froid : Technique frigorifique et climatisation Edition Webasto.
- [16]. <https://www.abcclim.net/evaporateur.html>
- [17]. https://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/td-maintenance-des-systemes

Références bibliographiques

- [18]. https://www.gunt.de/images/download/principles-of-cold-production_french.pdf
- [19]. W, Maake, H-J, Hekert et Cauchepin, Jean-Louis. Le Pohlmann - Manuel technique du froid - Tome 1. 2. Paris : Eyrolles, 1993. p. 1204.
- [20]. Chen, J. Evolution des fluides frigorigènes. National library of medicine. National center for biotechnology information. 2020.
- [21]. Coquelet, Christophe. Etude des fluides frigorigènes. Mesures et modélisations. Ecole des Mines de Paris. Paris : s.n., 2003. Thèse de doctorat
- [22]. Refrigerant types, issues, trends and future option. Sel, Varaj et Aseem, Kumar. 2013. ACRECON INDIA 8th-9th.
- [23]. Refrigeration, classification, properties and selection. DUAL TEMP clauger Engineering Buletin. 2020, 3, pp. 1-66.
- [24]. Comprendre l'impact de la réglementation F GAZ sur les fluides frigorigènes. Calculce par acsio energie. [En ligne] 5 aout 2022. [Citation : 9 septembre 2022.]
- [25]. Breidert, H-J. Calcul des chambres froides .Bilan frigorifique simplifié - Choix des composants. [éd.] PYC Livres. 1998. p. 118.
- [26]. Daval, Flavien. Etude et conception d'une installation frigorifique. Journal du net .com. [En ligne] <https://viadeo.journaldunet.com › flavien-daval-4671031>.

Annexes

Annexe 01: Diagramme de l'air humide



Annexe 02: Propriétés physiques de quelques fluides frigorigènes

| Fluide | | | | Masse molaire | $T_{eb}^{(1)}$ °C | $T_c^{(2)}$ °C | LII ⁽³⁾ % | $\Delta H^{(4)}$ MJ/kg | VME ⁽⁵⁾ ppm _v | Groupe | PRG ₁₀₀ ⁽⁶⁾ |
|----------------------------|--------------------|-------------------------------|---|---------------|----------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|--|--------|-----------------------------------|
| R-22 ⁽⁷⁾ | HCFC | Chlorodifluorométhane | CHClF ₂ | 86,47 | -40,8 | 96,1 | aucune | 2,2 | 1 000 | A1 | 1 810 |
| R-32 | HFC | Difluorométhane | CH ₂ F ₂ | 68,48 | -51,7 | 78,1 | 14,4 | 9,4 | 1 000 | A2L | 675 |
| R-125 | HFC | Pentafluoroéthane | CF ₃ CHF ₂ | 120,02 | -48,1 | 66 | aucune | -1,5 | 1 000 | A1 | 3500 |
| R-134a | HFC | 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane | CF ₃ CH ₂ F | 102,03 | -26,1 | 101,1 | aucune | 4,2 | 1 000 | A1 | 1430 |
| R-152a | HFC | 1,1-Difluoroéthane | CHF ₂ CH ₃ | 66,05 | -24 | 113,3 | 4,8 | 17,4 | 1 000 | A2 | 124 |
| R-404A | HFC | R125/143a/134a (44/52/4) | CF ₃ CHF ₂ +CF ₃ H ₃ + CF ₃ CH ₂ F | 97,6 | -46,2 | 72 | aucune | -6,6 | 1 000 | A1 | 3 900 |
| R-407C | HFC | R-32/125/134a (23/25/52) | CH ₂ F ₂ + CF ₃ CHF ₂ + CF ₃ CH ₂ F | 86,2 | -43,6 | 86 | aucune | -4,9 | 1 000 | A1 | 1 800 |
| R-410A | HFC | R-32/125 (50/50) | CH ₂ F ₂ + CF ₃ CHF ₂ | 72,58 | -51,4 | 160,5 | aucune | -4,4 | 1 000 | A1 | 2 100 |
| R-1234yf | HFC _{ins} | 2,3,3,3-tétrafluoroprop-1-ène | C ₃ F ₄ H ₂ | 114,04 | -29,5 | 94,7 | 6,2 | 10,7 | 500 | A2L | 4 |
| R-1234ze(E) | HFC _{ins} | tétrafluoropropène | C ₃ F ₄ H ₂ | 114,04 | -19 | 109,4 | 7,6 | | | | 6 |
| R-717 | Naturel | Ammoniac | NH ₃ | 17,03 | -33,3 | 132,3 | 16,7 | 22,5 | 25 | B2L | 0 |
| R-718 | Naturel | Eau | H ₂ O | 18,02 | 100 | 373,9 | aucune | | | A1 | 0 |
| R-744 | Naturel | Dioxyde de carbone | CO ₂ | 44,01 | | 31 | aucune | | 5 000 | A1 | 1 |
| R-1270 | HC | Propylène | C ₃ H ₆ | 42,08 | -47,6 | 91,1 | 2,7 | | 500 | A3 | 1,8 |
| R-290 | HC | Propane | C ₃ H ₈ | 44,1 | -42,1 | 96,7 | 2,1 | 50,4 | 1 000 | A3 | 3,3 |
| R-600a | HC | Isobutane | C ₄ H ₁₀ | 58,12 | -11,7 | 134,7 | 1,6 | 49,4 | 1 000 | A3 | 4 |

Valeurs de quelques propriétés physiques et de sécurité des principaux fluides frigorigènes détaillés dans cet ouvrage

1. Température d'ébullition à pression atmosphérique
2. Température critique
3. Limite inférieure d'inflammabilité
4. Chaleur de combustion
5. Valeur limite moyenne d'exposition (moyenne de 8 h/jour)
6. Les valeurs des PRG₁₀₀ des HFC et HCFC sont celles données par le GIEC AR4 (pour d'autres estimations, voir le tableau 2.8) ; celles des hydrocarbures sont des valeurs indirectes provenant de l'OMM ; celles des HFC insaturés (OMM)
7. Le R-22 est le seul fluide du tableau dont le PAO n'est pas nul, il vaut 0,055

Annexes

Annexe 03:table R404A

Table 1. Freon™ 404A Saturation Properties—Temperature Table

| Temp [°C] | Pressure [kPa] | | Volume [m³/kg] | | Density [kg/m³] | | Enthalpy [kJ/kg] | | | Entropy [kJ/(kg·K)] | | Temp [°C] |
|-----------|----------------|-------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|-------------|---------------------|-------------|-----------|
| | Liquid p_l | Vapor p_g | Liquid v_l | Vapor v_g | Liquid $1/v_l$ | Vapor $1/v_g$ | Liquid H_l | Latent H_{fg} | Vapor H_g | Liquid S_l | Vapor S_g | |
| -100 | 3.0 | 2.7 | 0.0007 | 5.3706 | 1436.6 | 0.186 | 75.6 | 229.6 | 305.2 | 0.4409 | 1.7728 | -100 |
| -99 | 3.3 | 3.0 | 0.0007 | 4.9310 | 1435.2 | 0.203 | 76.7 | 229.2 | 305.8 | 0.4472 | 1.7685 | -99 |
| -98 | 3.6 | 3.3 | 0.0007 | 4.5310 | 1433.7 | 0.221 | 77.8 | 228.7 | 306.5 | 0.4534 | 1.7644 | -98 |
| -97 | 3.9 | 3.6 | 0.0007 | 4.1701 | 1432.1 | 0.240 | 78.9 | 228.2 | 307.1 | 0.4596 | 1.7604 | -97 |
| -96 | 4.3 | 3.9 | 0.0007 | 3.8432 | 1430.4 | 0.260 | 80.0 | 227.7 | 307.7 | 0.4658 | 1.7565 | -96 |
| -95 | 4.6 | 4.3 | 0.0007 | 3.5448 | 1428.8 | 0.282 | 81.1 | 227.3 | 308.3 | 0.4719 | 1.7527 | -95 |
| -94 | 5.1 | 4.6 | 0.0007 | 3.2733 | 1427.0 | 0.306 | 82.1 | 226.8 | 308.9 | 0.4781 | 1.7489 | -94 |
| -93 | 5.5 | 5.1 | 0.0007 | 3.0257 | 1425.2 | 0.331 | 83.2 | 226.3 | 309.6 | 0.4842 | 1.7452 | -93 |
| -92 | 5.9 | 5.5 | 0.0007 | 2.7996 | 1423.3 | 0.357 | 84.4 | 225.8 | 310.2 | 0.4903 | 1.7417 | -92 |
| -91 | 6.4 | 6.0 | 0.0007 | 2.5934 | 1421.4 | 0.386 | 85.5 | 225.4 | 310.8 | 0.4963 | 1.7382 | -91 |
| -90 | 7.0 | 6.5 | 0.0007 | 2.4044 | 1419.5 | 0.416 | 86.6 | 224.9 | 311.4 | 0.5024 | 1.7347 | -90 |
| -89 | 7.5 | 7.0 | 0.0007 | 2.2321 | 1417.5 | 0.448 | 87.7 | 224.4 | 312.1 | 0.5084 | 1.7314 | -89 |
| -88 | 8.1 | 7.6 | 0.0007 | 2.0738 | 1415.4 | 0.482 | 88.8 | 223.9 | 312.7 | 0.5145 | 1.7281 | -88 |
| -87 | 8.8 | 8.2 | 0.0007 | 1.9286 | 1413.3 | 0.519 | 89.9 | 223.4 | 313.3 | 0.5205 | 1.7250 | -87 |
| -86 | 9.5 | 8.8 | 0.0007 | 1.7953 | 1411.2 | 0.557 | 91.0 | 222.9 | 314.0 | 0.5264 | 1.7219 | -86 |
| -85 | 10.2 | 9.5 | 0.0007 | 1.6728 | 1409.0 | 0.598 | 92.1 | 222.5 | 314.6 | 0.5324 | 1.7188 | -85 |
| -84 | 11.0 | 10.3 | 0.0007 | 1.5598 | 1406.8 | 0.641 | 93.3 | 222.0 | 315.2 | 0.5383 | 1.7159 | -84 |
| -83 | 11.8 | 11.1 | 0.0007 | 1.4560 | 1404.5 | 0.687 | 94.4 | 221.5 | 315.9 | 0.5443 | 1.7130 | -83 |
| -82 | 12.7 | 11.9 | 0.0007 | 1.3602 | 1402.2 | 0.735 | 95.5 | 221.0 | 316.5 | 0.5502 | 1.7101 | -82 |
| -81 | 13.6 | 12.8 | 0.0007 | 1.2718 | 1399.8 | 0.786 | 96.6 | 220.5 | 317.1 | 0.5561 | 1.7074 | -81 |
| -80 | 14.6 | 13.7 | 0.0007 | 1.1902 | 1397.4 | 0.840 | 97.8 | 220.0 | 317.8 | 0.5620 | 1.7047 | -80 |
| -79 | 15.7 | 14.7 | 0.0007 | 1.1147 | 1395.0 | 0.897 | 98.9 | 219.5 | 318.4 | 0.5678 | 1.7021 | -79 |
| -78 | 16.8 | 15.8 | 0.0007 | 1.0448 | 1392.6 | 0.957 | 100.0 | 219.0 | 319.1 | 0.5737 | 1.6995 | -78 |
| -77 | 17.9 | 16.9 | 0.0007 | 0.9801 | 1390.1 | 1.020 | 101.2 | 218.5 | 319.7 | 0.5795 | 1.6970 | -77 |
| -76 | 19.2 | 18.1 | 0.0007 | 0.9201 | 1387.6 | 1.087 | 102.3 | 218.0 | 320.4 | 0.5853 | 1.6945 | -76 |
| -75 | 20.5 | 19.3 | 0.0007 | 0.8645 | 1385.0 | 1.157 | 103.5 | 217.5 | 321.0 | 0.5911 | 1.6922 | -75 |
| -74 | 21.9 | 20.7 | 0.0007 | 0.8128 | 1382.4 | 1.230 | 104.6 | 217.0 | 321.6 | 0.5969 | 1.6898 | -74 |
| -73 | 23.3 | 22.1 | 0.0007 | 0.7648 | 1379.8 | 1.308 | 105.8 | 216.5 | 322.3 | 0.6027 | 1.6876 | -73 |
| -72 | 24.8 | 23.5 | 0.0007 | 0.7201 | 1377.2 | 1.389 | 106.9 | 216.0 | 322.9 | 0.6084 | 1.6854 | -72 |
| -71 | 26.5 | 25.1 | 0.0007 | 0.6785 | 1374.5 | 1.474 | 108.1 | 215.5 | 323.6 | 0.6142 | 1.6832 | -71 |
| -70 | 28.2 | 26.7 | 0.0007 | 0.6398 | 1371.9 | 1.563 | 109.3 | 215.0 | 324.2 | 0.6199 | 1.6811 | -70 |
| -69 | 29.9 | 28.4 | 0.0007 | 0.6036 | 1369.1 | 1.657 | 110.4 | 214.5 | 324.9 | 0.6256 | 1.6790 | -69 |
| -68 | 31.8 | 30.2 | 0.0007 | 0.5700 | 1366.4 | 1.755 | 111.6 | 214.0 | 325.5 | 0.6313 | 1.6770 | -68 |
| -67 | 33.8 | 32.1 | 0.0007 | 0.5385 | 1363.6 | 1.857 | 112.8 | 213.4 | 326.2 | 0.6370 | 1.6751 | -67 |
| -66 | 35.8 | 34.1 | 0.0007 | 0.5091 | 1360.9 | 1.964 | 113.9 | 212.9 | 326.8 | 0.6427 | 1.6732 | -66 |
| -65 | 38.0 | 36.2 | 0.0007 | 0.4816 | 1358.1 | 2.076 | 115.1 | 212.4 | 327.5 | 0.6483 | 1.6713 | -65 |
| -64 | 40.3 | 38.4 | 0.0007 | 0.4559 | 1355.2 | 2.193 | 116.3 | 211.9 | 328.2 | 0.6540 | 1.6695 | -64 |
| -63 | 42.7 | 40.7 | 0.0007 | 0.4319 | 1352.4 | 2.316 | 117.5 | 211.3 | 328.8 | 0.6596 | 1.6678 | -63 |
| -62 | 45.2 | 43.1 | 0.0007 | 0.4093 | 1349.6 | 2.443 | 118.7 | 210.8 | 329.5 | 0.6652 | 1.6661 | -62 |
| -61 | 47.8 | 45.7 | 0.0007 | 0.3881 | 1346.7 | 2.577 | 119.8 | 210.3 | 330.1 | 0.6708 | 1.6644 | -61 |
| -60 | 50.5 | 48.3 | 0.0007 | 0.3683 | 1343.8 | 2.715 | 121.0 | 209.7 | 330.8 | 0.6764 | 1.6628 | -60 |
| -59 | 53.3 | 51.1 | 0.0007 | 0.3497 | 1340.9 | 2.860 | 122.2 | 209.2 | 331.4 | 0.6820 | 1.6612 | -59 |
| -58 | 56.3 | 54.0 | 0.0007 | 0.3321 | 1337.9 | 3.011 | 123.4 | 208.6 | 332.1 | 0.6876 | 1.6596 | -58 |
| -57 | 59.4 | 57.0 | 0.0007 | 0.3157 | 1335.0 | 3.168 | 124.6 | 208.1 | 332.7 | 0.6931 | 1.6581 | -57 |
| -56 | 62.7 | 60.2 | 0.0008 | 0.3002 | 1332.1 | 3.331 | 125.8 | 207.5 | 333.4 | 0.6987 | 1.6567 | -56 |
| -55 | 66.1 | 63.4 | 0.0008 | 0.2856 | 1329.1 | 3.501 | 127.1 | 207.0 | 334.0 | 0.7042 | 1.6552 | -55 |
| -54 | 69.6 | 66.9 | 0.0008 | 0.2719 | 1326.1 | 3.678 | 128.3 | 206.4 | 334.7 | 0.7098 | 1.6539 | -54 |
| -53 | 73.3 | 70.5 | 0.0008 | 0.2590 | 1323.1 | 3.861 | 129.5 | 205.9 | 335.3 | 0.7153 | 1.6525 | -53 |
| -52 | 77.1 | 74.2 | 0.0008 | 0.2468 | 1320.1 | 4.052 | 130.7 | 205.3 | 336.0 | 0.7208 | 1.6512 | -52 |
| -51 | 81.1 | 78.1 | 0.0008 | 0.2353 | 1317.1 | 4.250 | 131.9 | 204.7 | 336.7 | 0.7263 | 1.6499 | -51 |
| -50 | 85.2 | 82.1 | 0.0008 | 0.2244 | 1314.1 | 4.456 | 133.1 | 204.2 | 337.3 | 0.7318 | 1.6487 | -50 |
| -49 | 89.5 | 86.4 | 0.0008 | 0.2142 | 1311.0 | 4.670 | 134.4 | 203.6 | 338.0 | 0.7373 | 1.6475 | -49 |
| -48 | 94.0 | 90.7 | 0.0008 | 0.2045 | 1308.0 | 4.891 | 135.6 | 203.0 | 338.6 | 0.7427 | 1.6463 | -48 |
| -47 | 98.7 | 95.3 | 0.0008 | 0.1953 | 1304.9 | 5.121 | 136.8 | 202.4 | 339.3 | 0.7482 | 1.6451 | -47 |
| -46 | 103.5 | 100.0 | 0.0008 | 0.1866 | 1301.8 | 5.359 | 138.1 | 201.8 | 339.9 | 0.7537 | 1.6440 | -46 |
| -45 | 108.6 | 104.9 | 0.0008 | 0.1784 | 1298.8 | 5.605 | 139.3 | 201.2 | 340.6 | 0.7591 | 1.6430 | -45 |
| -44 | 113.8 | 110.1 | 0.0008 | 0.1706 | 1295.7 | 5.861 | 140.6 | 200.6 | 341.2 | 0.7645 | 1.6419 | -44 |
| -43 | 119.2 | 115.4 | 0.0008 | 0.1633 | 1292.6 | 6.125 | 141.8 | 200.0 | 341.9 | 0.7700 | 1.6409 | -43 |
| -42 | 124.8 | 120.9 | 0.0008 | 0.1563 | 1289.5 | 6.399 | 143.1 | 199.4 | 342.5 | 0.7754 | 1.6399 | -42 |
| -41 | 130.6 | 126.6 | 0.0008 | 0.1496 | 1286.4 | 6.682 | 144.3 | 198.8 | 343.2 | 0.7808 | 1.6389 | -41 |

Annexes

Table 1. Freon™ 404A Saturation Properties—Temperature Table (continued)

| Temp [°C] | Pressure [kPa] | | Volume [m³/kg] | | Density [kg/m³] | | Enthalpy [kJ/kg] | | | Entropy [kJ/(kg·K)] | | Temp [°C] |
|-----------|----------------|-------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|-------------|---------------------|-------------|-----------|
| | Liquid p_s | Vapor p_s | Liquid v_f | Vapor v_g | Liquid $1/v_f$ | Vapor $1/v_g$ | Liquid h_f | Latent h_{fg} | Vapor h_g | Liquid s_f | Vapor s_g | |
| -40 | 136.7 | 132.5 | 0.0008 | 0.1434 | 1283.2 | 6.975 | 145.6 | 198.2 | 343.8 | 0.7862 | 1.6380 | -40 |
| -39 | 142.9 | 138.6 | 0.0008 | 0.1374 | 1280.1 | 7.278 | 146.9 | 197.6 | 344.5 | 0.7916 | 1.6371 | -39 |
| -38 | 149.4 | 144.9 | 0.0008 | 0.1317 | 1277.0 | 7.592 | 148.1 | 197.0 | 345.1 | 0.7970 | 1.6362 | -38 |
| -37 | 156.1 | 151.5 | 0.0008 | 0.1263 | 1273.8 | 7.916 | 149.4 | 196.3 | 345.8 | 0.8024 | 1.6353 | -37 |
| -36 | 163.0 | 158.3 | 0.0008 | 0.1212 | 1270.7 | 8.250 | 150.7 | 195.7 | 346.4 | 0.8077 | 1.6345 | -36 |
| -35 | 170.1 | 165.3 | 0.0008 | 0.1163 | 1267.5 | 8.595 | 152.4 | 194.6 | 347.0 | 0.8150 | 1.6337 | -35 |
| -34 | 177.5 | 172.6 | 0.0008 | 0.1117 | 1264.4 | 8.951 | 153.7 | 194.0 | 347.7 | 0.8203 | 1.6330 | -34 |
| -33 | 185.2 | 180.1 | 0.0008 | 0.1073 | 1261.2 | 9.319 | 155.0 | 193.4 | 348.3 | 0.8256 | 1.6322 | -33 |
| -32 | 193.0 | 187.8 | 0.0008 | 0.1031 | 1258.0 | 9.698 | 156.3 | 192.7 | 349.0 | 0.8309 | 1.6315 | -32 |
| -31 | 201.2 | 195.8 | 0.0008 | 0.0991 | 1254.9 | 10.090 | 157.5 | 192.1 | 349.6 | 0.8362 | 1.6308 | -31 |
| -30 | 209.5 | 204.1 | 0.0008 | 0.0953 | 1251.7 | 10.492 | 159.9 | 190.3 | 350.3 | 0.8460 | 1.6301 | -30 |
| -29 | 218.2 | 212.5 | 0.0008 | 0.0917 | 1248.5 | 10.906 | 161.2 | 189.7 | 350.9 | 0.8512 | 1.6295 | -29 |
| -28 | 227.0 | 221.3 | 0.0008 | 0.0882 | 1245.3 | 11.332 | 162.5 | 189.1 | 351.5 | 0.8563 | 1.6289 | -28 |
| -27 | 236.2 | 230.3 | 0.0008 | 0.0849 | 1242.2 | 11.772 | 163.7 | 188.4 | 352.2 | 0.8615 | 1.6283 | -27 |
| -26 | 245.7 | 239.7 | 0.0008 | 0.0818 | 1239.0 | 12.225 | 165.0 | 187.8 | 352.8 | 0.8667 | 1.6277 | -26 |
| -25 | 255.4 | 249.3 | 0.0008 | 0.0788 | 1235.8 | 12.692 | 166.3 | 187.1 | 353.4 | 0.8718 | 1.6271 | -25 |
| -24 | 265.4 | 259.2 | 0.0008 | 0.0759 | 1232.5 | 13.174 | 167.6 | 186.5 | 354.0 | 0.8769 | 1.6265 | -24 |
| -23 | 275.8 | 269.4 | 0.0008 | 0.0732 | 1229.3 | 13.669 | 168.9 | 185.8 | 354.7 | 0.8821 | 1.6260 | -23 |
| -22 | 286.4 | 279.9 | 0.0008 | 0.0705 | 1226.1 | 14.180 | 170.2 | 185.1 | 355.3 | 0.8872 | 1.6255 | -22 |
| -21 | 297.4 | 290.7 | 0.0008 | 0.0680 | 1222.8 | 14.705 | 171.5 | 184.4 | 355.9 | 0.8924 | 1.6250 | -21 |
| -20 | 308.7 | 301.8 | 0.0008 | 0.0656 | 1219.6 | 15.246 | 172.8 | 183.8 | 356.5 | 0.8975 | 1.6245 | -20 |
| -19 | 320.3 | 313.3 | 0.0008 | 0.0633 | 1216.3 | 15.803 | 174.1 | 183.1 | 357.1 | 0.9026 | 1.6240 | -19 |
| -18 | 332.2 | 325.1 | 0.0008 | 0.0611 | 1213.1 | 16.376 | 175.4 | 182.4 | 357.8 | 0.9078 | 1.6235 | -18 |
| -17 | 344.5 | 337.2 | 0.0008 | 0.0589 | 1209.8 | 16.966 | 176.7 | 181.7 | 358.4 | 0.9129 | 1.6231 | -17 |
| -16 | 357.1 | 349.7 | 0.0008 | 0.0569 | 1206.5 | 17.572 | 178.0 | 180.9 | 359.0 | 0.9180 | 1.6226 | -16 |
| -15 | 370.1 | 362.5 | 0.0008 | 0.0550 | 1203.2 | 18.196 | 179.4 | 180.2 | 359.6 | 0.9231 | 1.6222 | -15 |
| -14 | 383.4 | 375.7 | 0.0008 | 0.0531 | 1199.8 | 18.838 | 180.7 | 179.5 | 360.2 | 0.9282 | 1.6218 | -14 |
| -13 | 397.1 | 389.2 | 0.0008 | 0.0513 | 1196.5 | 19.498 | 182.1 | 178.7 | 360.8 | 0.9334 | 1.6214 | -13 |
| -12 | 411.1 | 403.1 | 0.0008 | 0.0496 | 1193.2 | 20.177 | 183.4 | 178.0 | 361.4 | 0.9385 | 1.6210 | -12 |
| -11 | 425.6 | 417.4 | 0.0008 | 0.0479 | 1189.8 | 20.875 | 184.7 | 177.2 | 362.0 | 0.9436 | 1.6206 | -11 |
| -10 | 440.4 | 432.1 | 0.0008 | 0.0463 | 1186.4 | 21.593 | 186.1 | 176.5 | 362.6 | 0.9487 | 1.6202 | -10 |
| -9 | 455.6 | 447.2 | 0.0008 | 0.0448 | 1183.0 | 22.331 | 187.5 | 175.7 | 363.2 | 0.9538 | 1.6198 | -9 |
| -8 | 471.2 | 462.6 | 0.0008 | 0.0433 | 1179.6 | 23.089 | 188.8 | 174.9 | 363.8 | 0.9589 | 1.6195 | -8 |
| -7 | 487.2 | 478.5 | 0.0009 | 0.0419 | 1176.1 | 23.868 | 190.2 | 174.1 | 364.3 | 0.9641 | 1.6191 | -7 |
| -6 | 503.6 | 494.7 | 0.0009 | 0.0405 | 1172.7 | 24.669 | 191.6 | 173.3 | 364.9 | 0.9692 | 1.6188 | -6 |
| -5 | 520.5 | 511.4 | 0.0009 | 0.0392 | 1169.2 | 25.492 | 193.0 | 172.5 | 365.5 | 0.9743 | 1.6184 | -5 |
| -4 | 537.7 | 528.5 | 0.0009 | 0.0380 | 1165.7 | 26.338 | 194.4 | 171.7 | 366.1 | 0.9794 | 1.6181 | -4 |
| -3 | 555.4 | 546.1 | 0.0009 | 0.0368 | 1162.2 | 27.207 | 195.8 | 170.9 | 366.6 | 0.9846 | 1.6178 | -3 |
| -2 | 573.5 | 564.1 | 0.0009 | 0.0356 | 1158.6 | 28.100 | 197.2 | 170.0 | 367.2 | 0.9897 | 1.6175 | -2 |
| -1 | 592.1 | 582.5 | 0.0009 | 0.0345 | 1155.1 | 29.018 | 198.6 | 169.2 | 367.7 | 0.9948 | 1.6171 | -1 |
| 0 | 611.1 | 601.3 | 0.0009 | 0.0334 | 1151.5 | 29.960 | 200.0 | 168.3 | 368.3 | 1.0000 | 1.6168 | 0 |
| 1 | 630.6 | 620.7 | 0.0009 | 0.0323 | 1147.8 | 30.928 | 201.4 | 167.4 | 368.9 | 1.0051 | 1.6165 | 1 |
| 2 | 650.6 | 640.5 | 0.0009 | 0.0313 | 1144.2 | 31.923 | 202.9 | 166.5 | 369.4 | 1.0102 | 1.6162 | 2 |
| 3 | 671.0 | 660.7 | 0.0009 | 0.0304 | 1140.5 | 32.944 | 204.3 | 165.7 | 369.9 | 1.0154 | 1.6159 | 3 |
| 4 | 691.9 | 681.5 | 0.0009 | 0.0294 | 1136.8 | 33.994 | 205.7 | 164.7 | 370.5 | 1.0205 | 1.6156 | 4 |
| 5 | 713.3 | 702.7 | 0.0009 | 0.0285 | 1133.0 | 35.072 | 207.2 | 163.8 | 371.0 | 1.0257 | 1.6153 | 5 |
| 6 | 735.1 | 724.5 | 0.0009 | 0.0276 | 1129.2 | 36.179 | 208.6 | 162.9 | 371.5 | 1.0308 | 1.6150 | 6 |
| 7 | 757.5 | 746.7 | 0.0009 | 0.0268 | 1125.4 | 37.316 | 210.1 | 162.0 | 372.1 | 1.0360 | 1.6147 | 7 |
| 8 | 780.4 | 769.5 | 0.0009 | 0.0260 | 1121.6 | 38.485 | 211.6 | 161.0 | 372.6 | 1.0412 | 1.6144 | 8 |
| 9 | 803.8 | 792.7 | 0.0009 | 0.0252 | 1117.7 | 39.685 | 213.1 | 160.0 | 373.1 | 1.0464 | 1.6141 | 9 |
| 10 | 827.8 | 816.5 | 0.0009 | 0.0244 | 1113.7 | 40.917 | 214.5 | 159.1 | 373.6 | 1.0515 | 1.6138 | 10 |
| 11 | 852.2 | 840.8 | 0.0009 | 0.0237 | 1109.8 | 42.184 | 216.0 | 158.1 | 374.1 | 1.0567 | 1.6135 | 11 |
| 12 | 877.2 | 865.7 | 0.0009 | 0.0230 | 1105.7 | 43.485 | 217.5 | 157.0 | 374.6 | 1.0619 | 1.6132 | 12 |
| 13 | 902.8 | 891.1 | 0.0009 | 0.0223 | 1101.7 | 44.821 | 219.1 | 156.0 | 375.1 | 1.0671 | 1.6129 | 13 |
| 14 | 928.9 | 917.1 | 0.0009 | 0.0216 | 1097.5 | 46.194 | 220.6 | 155.0 | 375.6 | 1.0723 | 1.6126 | 14 |
| 15 | 955.6 | 943.6 | 0.0009 | 0.0210 | 1093.4 | 47.605 | 222.1 | 153.9 | 376.0 | 1.0776 | 1.6123 | 15 |
| 16 | 982.8 | 970.7 | 0.0009 | 0.0204 | 1089.1 | 49.055 | 223.6 | 152.9 | 376.5 | 1.0828 | 1.6120 | 16 |
| 17 | 1010.6 | 998.4 | 0.0009 | 0.0198 | 1084.9 | 50.545 | 225.2 | 151.8 | 377.0 | 1.0880 | 1.6116 | 17 |
| 18 | 1039.0 | 1026.7 | 0.0009 | 0.0192 | 1080.5 | 52.076 | 226.7 | 150.7 | 377.4 | 1.0933 | 1.6113 | 18 |
| 19 | 1068.1 | 1055.6 | 0.0009 | 0.0186 | 1076.1 | 53.650 | 228.3 | 149.6 | 377.9 | 1.0985 | 1.6110 | 19 |

Annexes

Table 2. Freon™ 404A Superheated Vapor—Constant Pressure Table

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg·K) Saturation Properties in Light Blue

| Temp [°C] | Absolute Pressure [kPa] | | | | | | | | | | | | Temp [°C] |
|-----------|-------------------------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|
| | 10.0 | | | 20.0 | | | 30.0 | | | 40.0 | | | |
| | -84.36 °C | | | -74.49 °C | | | -68.13 °C | | | -63.31 °C | | | |
| | V | H | S | V | H | S | V | H | S | V | H | S | |
| -70 | 1.5992 | 315.0 | 1.7169 | 0.8378 | 321.3 | 1.6910 | 0.5742 | 325.5 | 1.6773 | 0.4392 | 328.6 | 1.6683 | -70 |
| -65 | 1.7225 | 324.6 | 1.7659 | 0.8572 | 324.4 | 1.7062 | | | | | | | -65 |
| -60 | 1.7654 | 328.0 | 1.7826 | 0.8788 | 327.8 | 1.7230 | 0.5833 | 327.6 | 1.6878 | | | | -60 |
| -55 | 1.8083 | 331.5 | 1.7992 | 0.9004 | 331.3 | 1.7396 | 0.5978 | 331.1 | 1.7045 | 0.4464 | 330.9 | 1.6794 | -55 |
| -50 | 1.8512 | 335.1 | 1.8157 | 0.9220 | 334.9 | 1.7561 | 0.6123 | 334.7 | 1.7210 | 0.4574 | 334.5 | 1.6959 | -50 |
| -45 | 1.8940 | 338.7 | 1.8320 | 0.9436 | 338.5 | 1.7724 | 0.6267 | 338.3 | 1.7373 | 0.4683 | 338.1 | 1.7123 | -45 |
| -40 | 1.9369 | 342.3 | 1.8481 | 0.9651 | 342.1 | 1.7886 | 0.6412 | 342.0 | 1.7535 | 0.4792 | 341.8 | 1.7285 | -40 |
| -35 | 1.9797 | 346.0 | 1.8642 | 0.9867 | 345.9 | 1.8047 | 0.6556 | 345.7 | 1.7696 | 0.4901 | 345.5 | 1.7446 | -35 |
| -30 | 2.0225 | 349.8 | 1.8801 | 1.0082 | 349.6 | 1.8206 | 0.6701 | 349.4 | 1.7856 | 0.5010 | 349.3 | 1.7606 | -30 |
| -25 | 2.0653 | 353.6 | 1.8959 | 1.0297 | 353.4 | 1.8364 | 0.6845 | 353.3 | 1.8014 | 0.5119 | 353.1 | 1.7765 | -25 |
| -20 | 2.1081 | 357.4 | 1.9115 | 1.0512 | 357.3 | 1.8521 | 0.6989 | 357.1 | 1.8171 | 0.5227 | 357.0 | 1.7922 | -20 |
| -15 | 2.1509 | 361.3 | 1.9271 | 1.0727 | 361.2 | 1.8677 | 0.7133 | 361.0 | 1.8327 | 0.5336 | 360.9 | 1.8078 | -15 |
| -10 | 2.1937 | 365.3 | 1.9425 | 1.0942 | 365.1 | 1.8831 | 0.7277 | 365.0 | 1.8482 | 0.5444 | 364.8 | 1.8233 | -10 |
| -5 | 2.2365 | 369.3 | 1.9579 | 1.1157 | 369.1 | 1.8985 | 0.7421 | 369.0 | 1.8636 | 0.5553 | 368.8 | 1.8387 | -5 |
| 0 | 2.2793 | 373.3 | 1.9731 | 1.1371 | 373.2 | 1.9137 | 0.7564 | 373.0 | 1.8788 | 0.5661 | 372.9 | 1.8540 | 0 |
| 5 | 2.3220 | 377.4 | 1.9882 | 1.1586 | 377.3 | 1.9289 | 0.7708 | 377.1 | 1.8940 | 0.5769 | 377.0 | 1.8692 | 5 |
| 10 | 2.3648 | 381.6 | 2.0033 | 1.1801 | 381.4 | 1.9439 | 0.7852 | 381.3 | 1.9091 | 0.5877 | 381.2 | 1.8844 | 10 |
| 15 | 2.4075 | 385.7 | 2.0182 | 1.2015 | 385.6 | 1.9589 | 0.7995 | 385.5 | 1.9240 | 0.5985 | 385.4 | 1.8992 | 15 |
| 20 | 2.4502 | 390.0 | 2.0330 | 1.2230 | 389.9 | 1.9737 | 0.8139 | 389.7 | 1.9389 | 0.6093 | 389.6 | 1.9141 | 20 |
| 25 | 2.4930 | 394.3 | 2.0478 | 1.2444 | 394.1 | 1.9885 | 0.8282 | 394.0 | 1.9536 | 0.6201 | 393.9 | 1.9289 | 25 |
| 30 | 2.5357 | 398.6 | 2.0624 | 1.2658 | 398.5 | 2.0031 | 0.8425 | 398.4 | 1.9683 | 0.6309 | 398.2 | 1.9435 | 30 |
| 35 | 2.5784 | 403.0 | 2.0770 | 1.2872 | 402.9 | 2.0177 | 0.8569 | 402.7 | 1.9829 | 0.6417 | 402.6 | 1.9581 | 35 |
| 40 | 2.6211 | 407.4 | 2.0915 | 1.3087 | 407.3 | 2.0322 | 0.8712 | 407.2 | 1.9974 | 0.6524 | 407.1 | 1.9726 | 40 |
| 45 | 2.6639 | 411.9 | 2.1058 | 1.3301 | 411.8 | 2.0466 | 0.8855 | 411.6 | 2.0118 | 0.6632 | 411.5 | 1.9870 | 45 |
| 50 | 2.7066 | 416.4 | 2.1202 | 1.3515 | 416.3 | 2.0609 | 0.8998 | 416.2 | 2.0261 | 0.6740 | 416.1 | 2.0014 | 50 |
| 55 | 2.7493 | 420.9 | 2.1344 | 1.3729 | 420.8 | 2.0751 | 0.9141 | 420.7 | 2.0403 | 0.6847 | 420.6 | 2.0156 | 55 |
| 60 | 2.7920 | 425.5 | 2.1485 | 1.3943 | 425.4 | 2.0893 | 0.9284 | 425.3 | 2.0545 | 0.6955 | 425.2 | 2.0298 | 60 |
| 65 | 2.8347 | 430.2 | 2.1626 | 1.4157 | 430.1 | 2.1033 | 0.9427 | 430.0 | 2.0686 | 0.7062 | 429.9 | 2.0439 | 65 |
| 70 | 2.8774 | 434.9 | 2.1765 | 1.4371 | 434.8 | 2.1173 | 0.9570 | 434.7 | 2.0826 | 0.7170 | 434.6 | 2.0579 | 70 |
| 75 | 2.9200 | 439.6 | 2.1905 | 1.4585 | 439.5 | 2.1312 | 0.9713 | 439.4 | 2.0965 | 0.7277 | 439.3 | 2.0718 | 75 |
| 80 | 2.9627 | 444.4 | 2.2043 | 1.4799 | 444.3 | 2.1450 | 0.9856 | 444.2 | 2.1103 | 0.7385 | 444.1 | 2.0856 | 80 |
| 85 | 3.0054 | 449.2 | 2.2180 | 1.5013 | 449.1 | 2.1588 | 0.9999 | 449.0 | 2.1241 | 0.7492 | 448.9 | 2.0994 | 85 |
| 90 | | | | | | | 1.0142 | 453.9 | 2.1378 | 0.7599 | 453.8 | 2.1131 | 90 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|---------|-------|------|-------|--------|--------|----|
| 63 | 3063.8 | 3052.3 | 0.0013 | 0.0047 | 755.0 | 212.799 | 313.7 | 68.8 | 382.5 | 1.3617 | 1.5664 | 63 |
| 64 | 3128.7 | 3117.6 | 0.0013 | 0.0045 | 741.0 | 221.659 | 316.5 | 65.2 | 381.8 | 1.3697 | 1.5633 | 64 |
| 65 | 3194.6 | 3184.0 | 0.0014 | 0.0043 | 726.2 | 231.271 | 319.5 | 61.5 | 380.9 | 1.3781 | 1.5599 | 65 |

Annexes

Table 2. Freon™ 404A Superheated Vapor—Constant Pressure Table (continued)

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg·K) Saturation Properties in Light Blue

| Absolute Pressure [kPa] | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|
| Temp [°C] | 280.0 | | | 290.0 | | | 300.0 | | | 310.0 | | | Temp [°C] |
| | -21.99 °C | | | -21.06 °C | | | -20.16 °C | | | -19.28 °C | | | |
| | V | H | S | V | H | S | V | H | S | V | H | S | |
| -20 | 0.0705 | 355.3 | 1.6255 | 0.0682 | 355.9 | 1.6250 | 0.0660 | 356.4 | 1.6245 | 0.0639 | 357.0 | 1.6241 | -20 |
| -15 | 0.0712 | 356.9 | 1.6319 | 0.0685 | 356.7 | 1.6284 | 0.0660 | 356.6 | 1.6251 | | | | -15 |
| -10 | 0.0729 | 361.0 | 1.6479 | 0.0702 | 360.8 | 1.6445 | 0.0677 | 360.7 | 1.6411 | 0.0653 | 360.5 | 1.6379 | -10 |
| -5 | 0.0747 | 365.1 | 1.6637 | 0.0719 | 365.0 | 1.6603 | 0.0693 | 364.8 | 1.6570 | 0.0669 | 364.7 | 1.6538 | -5 |
| 0 | 0.0764 | 369.3 | 1.6795 | 0.0736 | 369.2 | 1.6761 | 0.0709 | 369.0 | 1.6728 | 0.0685 | 368.8 | 1.6696 | 0 |
| 5 | 0.0781 | 373.5 | 1.6950 | 0.0752 | 373.4 | 1.6917 | 0.0725 | 373.2 | 1.6884 | 0.0700 | 373.1 | 1.6853 | 5 |
| 10 | 0.0798 | 377.8 | 1.7105 | 0.0769 | 377.6 | 1.7072 | 0.0742 | 377.5 | 1.7039 | 0.0716 | 377.4 | 1.7008 | 10 |
| 15 | 0.0815 | 382.1 | 1.7258 | 0.0785 | 382.0 | 1.7225 | 0.0757 | 381.8 | 1.7193 | 0.0731 | 381.7 | 1.7161 | 15 |
| 20 | 0.0832 | 386.4 | 1.7410 | 0.0802 | 386.3 | 1.7377 | 0.0773 | 386.2 | 1.7345 | 0.0747 | 386.0 | 1.7314 | 20 |
| 25 | 0.0849 | 390.8 | 1.7561 | 0.0818 | 390.7 | 1.7528 | 0.0789 | 390.6 | 1.7496 | 0.0762 | 390.4 | 1.7465 | 25 |
| 30 | 0.0865 | 395.3 | 1.7711 | 0.0834 | 395.1 | 1.7678 | 0.0805 | 395.0 | 1.7464 | 0.0777 | 394.9 | 1.7615 | 30 |
| 35 | 0.0882 | 399.7 | 1.7860 | 0.0850 | 399.6 | 1.7827 | 0.0820 | 399.5 | 1.7795 | 0.0793 | 399.3 | 1.7765 | 35 |
| 40 | 0.0899 | 404.2 | 1.8007 | 0.0866 | 404.1 | 1.7975 | 0.0836 | 404.0 | 1.7943 | 0.0808 | 403.9 | 1.7913 | 40 |
| 45 | 0.0915 | 408.8 | 1.8154 | 0.0882 | 408.7 | 1.8121 | 0.0851 | 408.6 | 1.8090 | 0.0823 | 408.4 | 1.8059 | 45 |
| 50 | 0.0931 | 413.4 | 1.8299 | 0.0898 | 413.3 | 1.8267 | 0.0867 | 413.2 | 1.8236 | 0.0838 | 413.0 | 1.8205 | 50 |
| 55 | 0.0948 | 418.0 | 1.8444 | 0.0914 | 417.9 | 1.8412 | 0.0882 | 417.8 | 1.8381 | 0.0853 | 417.7 | 1.8350 | 55 |
| 60 | 0.0964 | 422.7 | 1.8588 | 0.0930 | 422.6 | 1.8556 | 0.0896 | 422.5 | 1.8525 | 0.0868 | 422.4 | 1.8494 | 60 |
| 65 | 0.0981 | 427.4 | 1.8731 | 0.0946 | 427.3 | 1.8699 | 0.0913 | 427.2 | 1.8667 | 0.0882 | 427.1 | 1.8637 | 65 |
| 70 | 0.0997 | 432.2 | 1.8872 | 0.0961 | 432.1 | 1.8840 | 0.0928 | 432.0 | 1.8810 | 0.0897 | 431.9 | 1.8780 | 70 |
| 75 | 0.1013 | 437.0 | 1.9013 | 0.0977 | 436.9 | 1.8982 | 0.0943 | 436.8 | 1.8951 | 0.0912 | 436.7 | 1.8921 | 75 |
| 80 | 0.1029 | 441.8 | 1.9154 | 0.0993 | 441.7 | 1.9122 | 0.0959 | 441.6 | 1.9091 | 0.0927 | 441.5 | 1.9061 | 80 |
| 85 | 0.1045 | 446.7 | 1.9293 | 0.1008 | 446.6 | 1.9261 | 0.0974 | 446.5 | 1.9230 | 0.0941 | 446.4 | 1.9201 | 85 |
| 90 | 0.1062 | 451.6 | 1.9431 | 0.1024 | 451.5 | 1.9400 | 0.0989 | 451.5 | 1.9369 | 0.0956 | 451.4 | 1.9339 | 90 |
| 95 | 0.1078 | 456.6 | 1.9569 | 0.1040 | 456.5 | 1.9537 | 0.1004 | 456.4 | 1.9507 | 0.0971 | 456.3 | 1.9477 | 95 |
| 100 | 0.1094 | 461.6 | 1.9706 | 0.1055 | 461.5 | 1.9674 | 0.1019 | 461.4 | 1.9644 | 0.0985 | 461.3 | 1.9614 | 100 |
| 105 | 0.1110 | 466.7 | 1.9842 | 0.1071 | 466.6 | 1.9810 | 0.1034 | 466.5 | 1.9780 | 0.1000 | 466.4 | 1.9750 | 105 |
| 110 | 0.1126 | 471.7 | 1.9977 | 0.1086 | 471.6 | 1.9946 | 0.1049 | 471.6 | 1.9915 | 0.1014 | 471.5 | 1.9886 | 110 |
| 115 | 0.1142 | 476.9 | 2.0112 | 0.1101 | 476.8 | 2.0080 | 0.1064 | 476.7 | 2.0050 | 0.1029 | 476.6 | 2.0020 | 115 |
| 120 | 0.1158 | 482.0 | 2.0245 | 0.1117 | 481.9 | 2.0214 | 0.1079 | 481.9 | 2.0184 | 0.1043 | 481.8 | 2.0154 | 120 |
| 125 | 0.1174 | 487.2 | 2.0378 | 0.1132 | 487.1 | 2.0347 | 0.1094 | 487.1 | 2.0317 | 0.1058 | 487.0 | 2.0287 | 125 |
| 130 | 0.1189 | 492.4 | 2.0511 | 0.1148 | 492.4 | 2.0479 | 0.1109 | 492.3 | 2.0449 | 0.1072 | 492.2 | 2.0420 | 130 |
| 135 | 0.1205 | 497.7 | 2.0642 | 0.1163 | 497.6 | 2.0611 | 0.1124 | 497.6 | 2.0581 | 0.1087 | 497.5 | 2.0552 | 135 |
| 135 | | | | | | | | | | 0.1101 | 502.8 | 2.0683 | 135 |

Annexes

Table 2. Freon™ 404A Superheated Vapor—Constant Pressure Table (continued)

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg·K) Saturation Properties in Light Blue

| Absolute Pressure [kPa] | | | | | | | | | | | | | Temp [°C] |
|-------------------------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|-----------|
| Temp [°C] | 1900.0 | | | 2000.0 | | | 2200.0 | | | 2400.0 | | | |
| | 41.91 °C | | | 44.08 °C | | | 48.17 °C | | | 52.00 °C | | | |
| | V | H | S | V | H | S | V | H | S | V | H | S | |
| | 0.0095 | 385.4 | 1.5991 | 0.0089 | 385.7 | 1.5972 | 0.0078 | 386.1 | 1.5931 | 0.0069 | 386.0 | 1.5884 | |
| 45 | 0.0098 | 389.2 | 1.6110 | 0.0090 | 386.9 | 1.6009 | | | | | | | 45 |
| 50 | 0.0103 | 395.1 | 1.6296 | 0.0095 | 393.1 | 1.6203 | 0.0080 | 388.6 | 1.6009 | | | | 50 |
| 55 | 0.0107 | 401.0 | 1.6475 | 0.0099 | 399.1 | 1.6388 | 0.0085 | 395.1 | 1.6210 | 0.0073 | 390.4 | 1.6019 | 55 |
| 60 | 0.0111 | 406.7 | 1.6649 | 0.0103 | 405.0 | 1.6566 | 0.0089 | 401.4 | 1.6400 | 0.0077 | 397.3 | 1.6227 | 60 |
| 65 | 0.0115 | 412.4 | 1.6817 | 0.0107 | 410.8 | 1.6738 | 0.0093 | 407.5 | 1.6581 | 0.0081 | 403.9 | 1.6422 | 65 |
| 70 | 0.0119 | 418.0 | 1.6982 | 0.0111 | 416.5 | 1.6906 | 0.0097 | 413.5 | 1.6757 | 0.0085 | 410.2 | 1.6607 | 70 |
| 75 | 0.0123 | 423.6 | 1.7144 | 0.0115 | 422.2 | 1.7071 | 0.0101 | 419.4 | 1.6927 | 0.0089 | 416.3 | 1.6785 | 75 |
| 80 | 0.0127 | 429.1 | 1.7303 | 0.0119 | 427.9 | 1.7232 | 0.0104 | 425.2 | 1.7093 | 0.0092 | 422.3 | 1.6957 | 80 |
| 85 | 0.0130 | 434.7 | 1.7459 | 0.0122 | 433.5 | 1.7390 | 0.0108 | 431.0 | 1.7255 | 0.0096 | 428.3 | 1.7124 | 85 |
| 90 | 0.0134 | 440.3 | 1.7613 | 0.0125 | 439.1 | 1.7545 | 0.0111 | 436.7 | 1.7414 | 0.0099 | 434.2 | 1.7288 | 90 |
| 95 | 0.0137 | 445.8 | 1.7765 | 0.0129 | 444.7 | 1.7699 | 0.0114 | 442.4 | 1.7571 | 0.0102 | 440.1 | 1.7448 | 95 |
| 100 | 0.0140 | 451.4 | 1.7915 | 0.0132 | 450.3 | 1.7850 | 0.0117 | 448.1 | 1.7725 | 0.0105 | 445.9 | 1.7605 | 100 |
| 105 | 0.0144 | 456.9 | 1.8063 | 0.0135 | 455.9 | 1.7999 | 0.0120 | 453.8 | 1.7877 | 0.0108 | 451.7 | 1.7760 | 105 |
| 110 | 0.0147 | 462.5 | 1.8209 | 0.0138 | 461.5 | 1.8146 | 0.0123 | 459.5 | 1.8026 | 0.0111 | 457.5 | 1.7912 | 110 |
| 115 | 0.0150 | 468.1 | 1.8354 | 0.0141 | 467.1 | 1.8292 | 0.0126 | 465.2 | 1.8174 | 0.0114 | 463.3 | 1.8062 | 115 |
| 120 | 0.0153 | 473.7 | 1.8497 | 0.0144 | 472.8 | 1.8437 | 0.0129 | 470.9 | 1.8320 | 0.0116 | 469.1 | 1.8210 | 120 |
| 125 | 0.0156 | 479.3 | 1.8639 | 0.0147 | 478.4 | 1.8579 | 0.0132 | 476.7 | 1.8465 | 0.0119 | 474.9 | 1.8357 | 125 |
| 130 | 0.0159 | 484.9 | 1.8780 | 0.0150 | 484.1 | 1.8721 | 0.0135 | 482.4 | 1.8608 | 0.0122 | 480.7 | 1.8502 | 130 |
| 135 | 0.0162 | 490.6 | 1.8920 | 0.0153 | 489.8 | 1.8861 | 0.0137 | 488.1 | 1.8750 | 0.0124 | 486.5 | 1.8645 | 135 |
| 140 | 0.0165 | 496.3 | 1.9058 | 0.0156 | 495.5 | 1.9000 | 0.0140 | 493.9 | 1.8890 | 0.0127 | 492.3 | 1.8786 | 140 |
| 145 | 0.0168 | 502.0 | 1.9195 | 0.0159 | 501.2 | 1.9137 | 0.0143 | 499.7 | 1.9029 | 0.0129 | 498.1 | 1.8926 | 145 |
| 150 | 0.0171 | 507.7 | 1.9331 | 0.0162 | 506.9 | 1.9274 | 0.0145 | 505.5 | 1.9166 | 0.0132 | 503.9 | 1.9065 | 150 |
| 155 | 0.0174 | 513.4 | 1.9466 | 0.0164 | 512.7 | 1.9409 | 0.0148 | 511.3 | 1.9303 | 0.0134 | 509.8 | 1.9203 | 155 |
| 160 | 0.0177 | 519.2 | 1.9600 | 0.0167 | 518.5 | 1.9544 | 0.0150 | 517.1 | 1.9438 | 0.0136 | 515.7 | 1.9339 | 160 |
| 165 | 0.0180 | 525.0 | 1.9732 | 0.0170 | 524.3 | 1.9677 | 0.0153 | 522.9 | 1.9572 | 0.0139 | 521.6 | 1.9475 | 165 |
| 170 | 0.0182 | 530.8 | 1.9864 | 0.0173 | 530.1 | 1.9809 | 0.0155 | 528.8 | 1.9706 | 0.0141 | 527.5 | 1.9609 | 170 |
| 175 | 0.0185 | 536.6 | 1.9995 | 0.0175 | 536.0 | 1.9941 | 0.0158 | 534.7 | 1.9838 | 0.0144 | 533.4 | 1.9742 | 175 |
| 180 | 0.0188 | 542.5 | 2.0125 | 0.0178 | 541.9 | 2.0071 | 0.0160 | 540.6 | 1.9969 | 0.0146 | 539.4 | 1.9874 | 180 |
| 185 | 0.0191 | 548.4 | 2.0254 | 0.0181 | 547.8 | 2.0201 | 0.0163 | 546.5 | 2.0099 | 0.0148 | 545.3 | 2.0005 | 185 |
| 190 | 0.0194 | 554.3 | 2.0383 | 0.0183 | 553.7 | 2.0329 | 0.0165 | 552.5 | 2.0229 | 0.0150 | 551.3 | 2.0135 | 190 |
| 195 | 0.0196 | 560.2 | 2.0510 | 0.0186 | 559.6 | 2.0457 | 0.0168 | 558.5 | 2.0357 | 0.0153 | 557.3 | 2.0264 | 195 |
| 200 | | | | | | | 0.0170 | 564.5 | 2.0484 | 0.0155 | 563.3 | 2.0392 | 200 |
| 205 | | | | | | | | | | 0.0157 | 569.4 | 2.0519 | 205 |

Annexes

Table 1. Freon™ 134a Saturation Properties—Temperature Table (continued)

| Temp [°C] | Pressure | Volume [m ³ /kg] | | Density [kg/m ³] | | Enthalpy [kJ/kg] | | | Entropy [kJ/(kg)(K)] | | Temp [°C] |
|-----------|-----------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| | kPa (abs) | Liquid v _l | Vapor v _g | Liquid 1/v _l | Vapor 1/v _g | Liquid h _l | Latent h _{fg} | Vapor h _g | Liquid s _l | Vapor s _g | |
| 22 | 608.49 | 0.0008 | 0.0338 | 1217.0 | 29.549 | 230.4 | 180.7 | 411.0 | 1.1060 | 1.7182 | 22 |
| 23 | 627.25 | 0.0008 | 0.0328 | 1213.3 | 30.462 | 231.8 | 179.8 | 411.6 | 1.1107 | 1.7178 | 23 |
| 24 | 646.44 | 0.0008 | 0.0318 | 1209.6 | 31.399 | 233.2 | 178.9 | 412.1 | 1.1155 | 1.7175 | 24 |
| 25 | 666.06 | 0.0008 | 0.0309 | 1205.9 | 32.359 | 234.6 | 178.0 | 412.6 | 1.1202 | 1.7171 | 25 |
| 26 | 686.13 | 0.0008 | 0.0300 | 1202.1 | 33.344 | 236.1 | 177.0 | 413.1 | 1.1250 | 1.7168 | 26 |
| 27 | 706.66 | 0.0008 | 0.0291 | 1198.3 | 34.354 | 237.5 | 176.1 | 413.6 | 1.1297 | 1.7165 | 27 |
| 28 | 727.64 | 0.0008 | 0.0283 | 1194.4 | 35.389 | 238.9 | 175.2 | 414.1 | 1.1345 | 1.7161 | 28 |
| 29 | 749.04 | 0.0008 | 0.0274 | 1190.6 | 36.451 | 240.4 | 174.2 | 414.6 | 1.1392 | 1.7158 | 29 |
| 30 | 771.02 | 0.0008 | 0.0266 | 1186.7 | 37.540 | 241.8 | 173.3 | 415.1 | 1.1439 | 1.7155 | 30 |
| 31 | 793.43 | 0.0008 | 0.0259 | 1182.8 | 38.657 | 243.3 | 172.3 | 415.6 | 1.1487 | 1.7151 | 31 |
| 32 | 816.28 | 0.0008 | 0.0251 | 1178.8 | 39.802 | 244.8 | 171.3 | 416.1 | 1.1534 | 1.7148 | 32 |
| 33 | 839.66 | 0.0009 | 0.0244 | 1174.9 | 40.975 | 246.2 | 170.3 | 416.6 | 1.1581 | 1.7145 | 33 |
| 34 | 863.53 | 0.0009 | 0.0237 | 1170.8 | 42.179 | 247.7 | 169.3 | 417.0 | 1.1628 | 1.7142 | 34 |
| 35 | 887.91 | 0.0009 | 0.0230 | 1166.8 | 43.413 | 249.2 | 168.3 | 417.5 | 1.1676 | 1.7138 | 35 |
| 36 | 912.80 | 0.0009 | 0.0224 | 1162.7 | 44.679 | 250.6 | 167.3 | 418.0 | 1.1723 | 1.7135 | 36 |
| 37 | 938.20 | 0.0009 | 0.0218 | 1158.6 | 45.977 | 252.1 | 166.3 | 418.4 | 1.1770 | 1.7132 | 37 |
| 38 | 964.14 | 0.0009 | 0.0211 | 1154.5 | 47.308 | 253.6 | 165.3 | 418.9 | 1.1817 | 1.7129 | 38 |
| 39 | 990.60 | 0.0009 | 0.0205 | 1150.3 | 48.672 | 255.1 | 164.2 | 419.3 | 1.1864 | 1.7125 | 39 |
| 40 | 1017.61 | 0.0009 | 0.0200 | 1146.1 | 50.072 | 256.6 | 163.2 | 419.8 | 1.1912 | 1.7122 | 40 |
| 41 | 1045.16 | 0.0009 | 0.0194 | 1141.9 | 51.508 | 258.1 | 162.1 | 420.2 | 1.1959 | 1.7119 | 41 |
| 42 | 1073.26 | 0.0009 | 0.0189 | 1137.6 | 52.980 | 259.6 | 161.0 | 420.6 | 1.2006 | 1.7115 | 42 |
| 43 | 1101.93 | 0.0009 | 0.0184 | 1133.3 | 54.490 | 261.1 | 159.9 | 421.1 | 1.2053 | 1.7112 | 43 |
| 44 | 1131.16 | 0.0009 | 0.0178 | 1128.9 | 56.040 | 262.7 | 158.8 | 421.5 | 1.2101 | 1.7108 | 44 |
| 45 | 1161.01 | 0.0009 | 0.0174 | 1124.5 | 57.630 | 264.2 | 157.7 | 421.9 | 1.2148 | 1.7105 | 45 |
| 46 | 1191.41 | 0.0009 | 0.0169 | 1120.0 | 59.261 | 265.7 | 156.6 | 422.3 | 1.2195 | 1.7101 | 46 |
| 47 | 1222.41 | 0.0009 | 0.0164 | 1115.6 | 60.934 | 267.3 | 155.4 | 422.7 | 1.2242 | 1.7097 | 47 |
| 48 | 1253.95 | 0.0009 | 0.0160 | 1111.0 | 62.652 | 268.8 | 154.3 | 423.1 | 1.2290 | 1.7093 | 48 |
| 49 | 1286.17 | 0.0009 | 0.0155 | 1106.4 | 64.415 | 270.4 | 153.1 | 423.5 | 1.2337 | 1.7089 | 49 |
| 50 | 1319.00 | 0.0009 | 0.0151 | 1101.8 | 66.225 | 271.9 | 151.9 | 423.8 | 1.2384 | 1.7086 | 50 |
| 51 | 1352.44 | 0.0009 | 0.0147 | 1097.1 | 68.084 | 273.5 | 150.7 | 424.2 | 1.2432 | 1.7082 | 51 |
| 52 | 1386.52 | 0.0009 | 0.0143 | 1092.4 | 69.992 | 275.1 | 149.5 | 424.6 | 1.2479 | 1.7077 | 52 |
| 53 | 1421.23 | 0.0009 | 0.0139 | 1087.6 | 71.952 | 276.6 | 148.3 | 424.9 | 1.2527 | 1.7073 | 53 |
| 54 | 1456.58 | 0.0009 | 0.0135 | 1082.8 | 73.966 | 278.2 | 147.0 | 425.3 | 1.2574 | 1.7069 | 54 |
| 55 | 1492.59 | 0.0009 | 0.0132 | 1077.9 | 76.035 | 279.8 | 145.8 | 425.6 | 1.2622 | 1.7064 | 55 |
| 56 | 1529.26 | 0.0009 | 0.0128 | 1072.9 | 78.162 | 281.4 | 144.5 | 425.9 | 1.2670 | 1.7059 | 56 |
| 57 | 1566.61 | 0.0009 | 0.0124 | 1067.9 | 80.348 | 283.0 | 143.2 | 426.2 | 1.2717 | 1.7055 | 57 |
| 58 | 1604.63 | 0.0009 | 0.0121 | 1062.8 | 82.596 | 284.6 | 141.9 | 426.5 | 1.2765 | 1.7050 | 58 |
| 59 | 1643.35 | 0.0009 | 0.0118 | 1057.7 | 84.908 | 286.3 | 140.5 | 426.8 | 1.2813 | 1.7044 | 59 |
| 60 | 1682.76 | 0.0010 | 0.0115 | 1052.5 | 87.287 | 287.9 | 139.2 | 427.1 | 1.2861 | 1.7039 | 60 |
| 61 | 1722.88 | 0.0010 | 0.0111 | 1047.2 | 89.735 | 289.5 | 137.8 | 427.4 | 1.2909 | 1.7033 | 61 |
| 62 | 1763.72 | 0.0010 | 0.0108 | 1041.8 | 92.255 | 291.2 | 136.4 | 427.6 | 1.2957 | 1.7028 | 62 |
| 63 | 1805.28 | 0.0010 | 0.0105 | 1036.4 | 94.851 | 292.9 | 135.0 | 427.9 | 1.3006 | 1.7021 | 63 |
| 64 | 1847.47 | 0.0010 | 0.0103 | 1030.9 | 97.526 | 294.5 | 133.6 | 428.1 | 1.3054 | 1.7015 | 64 |
| 65 | 1890.54 | 0.0010 | 0.0100 | 1025.3 | 100.283 | 296.2 | 132.1 | 428.3 | 1.3102 | 1.7009 | 65 |
| 66 | 1934.36 | 0.0010 | 0.0097 | 1019.6 | 103.125 | 297.9 | 130.6 | 428.5 | 1.3151 | 1.7002 | 66 |
| 67 | 1978.94 | 0.0010 | 0.0094 | 1013.8 | 106.058 | 299.6 | 129.1 | 428.7 | 1.3200 | 1.6995 | 67 |
| 68 | 2024.28 | 0.0010 | 0.0092 | 1008.0 | 109.085 | 301.3 | 127.5 | 428.8 | 1.3249 | 1.6987 | 68 |
| 69 | 2070.42 | 0.0010 | 0.0089 | 1002.0 | 112.212 | 303.0 | 126.0 | 429.0 | 1.3298 | 1.6979 | 69 |
| 70 | 2117.34 | 0.0010 | 0.0087 | 995.9 | 115.442 | 304.8 | 124.4 | 429.1 | 1.3347 | 1.6971 | 70 |
| 71 | 2165.08 | 0.0010 | 0.0084 | 989.7 | 118.783 | 306.5 | 122.7 | 429.2 | 1.3397 | 1.6963 | 71 |
| 72 | 2213.63 | 0.0010 | 0.0082 | 983.4 | 122.239 | 308.3 | 121.1 | 429.3 | 1.3446 | 1.6954 | 72 |
| 73 | 2263.01 | 0.0010 | 0.0079 | 977.0 | 125.818 | 310.1 | 119.4 | 429.4 | 1.3496 | 1.6945 | 73 |
| 74 | 2313.23 | 0.0010 | 0.0077 | 970.4 | 129.527 | 311.8 | 117.6 | 429.5 | 1.3547 | 1.6935 | 74 |
| 75 | 2364.31 | 0.0010 | 0.0075 | 963.7 | 133.373 | 313.7 | 115.8 | 429.5 | 1.3597 | 1.6924 | 75 |
| 76 | 2416.25 | 0.0010 | 0.0073 | 956.9 | 137.366 | 315.5 | 114.0 | 429.5 | 1.3648 | 1.6913 | 76 |
| 77 | 2469.08 | 0.0011 | 0.0071 | 949.9 | 141.514 | 317.3 | 112.2 | 429.5 | 1.3699 | 1.6902 | 77 |
| 78 | 2522.79 | 0.0011 | 0.0069 | 942.7 | 145.830 | 319.2 | 110.3 | 429.4 | 1.3750 | 1.6891 | 78 |
| 79 | 2577.42 | 0.0011 | 0.0067 | 935.4 | 150.324 | 321.0 | 108.3 | 429.3 | 1.3801 | 1.6877 | 79 |
| 80 | 2632.97 | 0.0011 | 0.0065 | 927.8 | 155.010 | 322.9 | 106.3 | 429.2 | 1.3854 | 1.6863 | 80 |
| 81 | 2689.46 | 0.0011 | 0.0063 | 920.1 | 159.904 | 324.9 | 104.2 | 429.1 | 1.3906 | 1.6849 | 81 |
| 82 | 2746.90 | 0.0011 | 0.0061 | 912.1 | 165.022 | 326.8 | 102.1 | 428.9 | 1.3959 | 1.6834 | 82 |

Annexes

Annexe 04: Table R134a

Table 1. Freon™ 134a Saturation Properties—Temperature Table

| Temp [°C] | Pressure | Volume [m³/kg] | | Density [kg/m³] | | Enthalpy [kJ/kg] | | | Entropy [kJ/(kg)(K)] | | Temp [°C] |
|-----------|-----------|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|-------------|----------------------|-------------|-----------|
| | kPa (abs) | Liquid v_f | Vapor v_g | Liquid $1/v_f$ | Vapor $1/v_g$ | Liquid h_f | Latent h_{fg} | Vapor h_g | Liquid s_f | Vapor s_g | |
| -100 | 0.57 | 0.0006 | 25.0000 | 1580.5 | 0.040 | 77.3 | 259.9 | 337.2 | 0.4448 | 1.9460 | -100 |
| -99 | 0.63 | 0.0006 | 22.7273 | 1577.8 | 0.044 | 78.4 | 259.4 | 337.8 | 0.4514 | 1.9407 | -99 |
| -98 | 0.70 | 0.0006 | 20.4082 | 1575.0 | 0.049 | 79.6 | 258.8 | 338.4 | 0.4581 | 1.9356 | -98 |
| -97 | 0.77 | 0.0006 | 18.5185 | 1572.3 | 0.054 | 80.7 | 258.2 | 339.0 | 0.4646 | 1.9306 | -97 |
| -96 | 0.86 | 0.0006 | 16.9492 | 1569.5 | 0.059 | 81.9 | 257.7 | 339.6 | 0.4711 | 1.9257 | -96 |
| -95 | 0.95 | 0.0006 | 15.3846 | 1566.8 | 0.065 | 83.0 | 257.1 | 340.1 | 0.4776 | 1.9209 | -95 |
| -94 | 1.04 | 0.0006 | 13.8889 | 1564.1 | 0.072 | 84.2 | 256.6 | 340.7 | 0.4841 | 1.9161 | -94 |
| -93 | 1.15 | 0.0006 | 12.6582 | 1561.3 | 0.079 | 85.3 | 256.0 | 341.3 | 0.4905 | 1.9115 | -93 |
| -92 | 1.27 | 0.0006 | 11.6279 | 1558.6 | 0.086 | 86.5 | 255.4 | 341.9 | 0.4968 | 1.9070 | -92 |
| -91 | 1.40 | 0.0006 | 10.6383 | 1555.8 | 0.094 | 87.6 | 254.9 | 342.5 | 0.5032 | 1.9025 | -91 |
| -90 | 1.53 | 0.0006 | 9.7087 | 1553.1 | 0.103 | 88.8 | 254.3 | 343.1 | 0.5095 | 1.8982 | -90 |
| -89 | 1.68 | 0.0006 | 8.9286 | 1550.4 | 0.112 | 89.9 | 253.8 | 343.7 | 0.5158 | 1.8939 | -89 |
| -88 | 1.84 | 0.0006 | 8.1967 | 1547.6 | 0.122 | 91.1 | 253.2 | 344.3 | 0.5220 | 1.8898 | -88 |
| -87 | 2.02 | 0.0006 | 7.5188 | 1544.9 | 0.133 | 92.3 | 252.7 | 344.9 | 0.5282 | 1.8857 | -87 |
| -86 | 2.20 | 0.0006 | 6.8966 | 1542.1 | 0.145 | 93.4 | 252.1 | 345.5 | 0.5344 | 1.8817 | -86 |
| -85 | 2.41 | 0.0006 | 6.3291 | 1539.4 | 0.158 | 94.6 | 251.6 | 346.2 | 0.5406 | 1.8778 | -85 |
| -84 | 2.63 | 0.0007 | 5.8480 | 1536.7 | 0.171 | 95.7 | 251.0 | 346.8 | 0.5467 | 1.8739 | -84 |
| -83 | 2.86 | 0.0007 | 5.4054 | 1533.9 | 0.185 | 96.9 | 250.5 | 347.4 | 0.5528 | 1.8702 | -83 |
| -82 | 3.11 | 0.0007 | 4.9751 | 1531.2 | 0.201 | 98.0 | 249.9 | 348.0 | 0.5589 | 1.8665 | -82 |
| -81 | 3.39 | 0.0007 | 4.6083 | 1528.5 | 0.217 | 99.2 | 249.4 | 348.6 | 0.5650 | 1.8629 | -81 |
| -80 | 3.68 | 0.0007 | 4.2553 | 1525.7 | 0.235 | 100.4 | 248.8 | 349.2 | 0.5710 | 1.8594 | -80 |
| -79 | 3.99 | 0.0007 | 3.9526 | 1523.0 | 0.253 | 101.5 | 248.3 | 349.8 | 0.5770 | 1.8559 | -79 |
| -78 | 4.33 | 0.0007 | 3.6630 | 1520.2 | 0.273 | 102.7 | 247.7 | 350.4 | 0.5830 | 1.8525 | -78 |
| -77 | 4.69 | 0.0007 | 3.3898 | 1517.5 | 0.295 | 103.9 | 247.2 | 351.1 | 0.5890 | 1.8492 | -77 |
| -76 | 5.07 | 0.0007 | 3.1546 | 1514.8 | 0.317 | 105.0 | 246.6 | 351.7 | 0.5949 | 1.846 | -76 |
| -75 | 5.48 | 0.0007 | 2.9326 | 1512.0 | 0.341 | 106.2 | 246.1 | 352.3 | 0.6009 | 1.8428 | -75 |
| -74 | 5.92 | 0.0007 | 2.7248 | 1509.3 | 0.367 | 107.4 | 245.5 | 352.9 | 0.6068 | 1.8397 | -74 |
| -73 | 6.39 | 0.0007 | 2.5381 | 1506.5 | 0.394 | 108.6 | 245.0 | 353.5 | 0.6126 | 1.8366 | -73 |
| -72 | 6.89 | 0.0007 | 2.3641 | 1503.8 | 0.423 | 109.7 | 244.4 | 354.2 | 0.6185 | 1.8336 | -72 |
| -71 | 7.42 | 0.0007 | 2.2075 | 1501.0 | 0.453 | 110.9 | 243.9 | 354.8 | 0.6243 | 1.8307 | -71 |
| -70 | 7.98 | 0.0007 | 2.0576 | 1498.3 | 0.486 | 112.1 | 243.3 | 355.4 | 0.6302 | 1.8279 | -70 |
| -69 | 8.58 | 0.0007 | 1.9231 | 1495.5 | 0.520 | 113.3 | 242.8 | 356.0 | 0.6360 | 1.8251 | -69 |
| -68 | 9.22 | 0.0007 | 1.7986 | 1492.8 | 0.556 | 114.5 | 242.2 | 356.6 | 0.6417 | 1.8223 | -68 |
| -67 | 9.89 | 0.0007 | 1.6835 | 1490.0 | 0.594 | 115.6 | 241.6 | 357.3 | 0.6475 | 1.8196 | -67 |
| -66 | 10.61 | 0.0007 | 1.5773 | 1487.3 | 0.634 | 116.8 | 241.1 | 357.9 | 0.6532 | 1.817 | -66 |
| -65 | 11.37 | 0.0007 | 1.4771 | 1484.5 | 0.677 | 118.0 | 240.5 | 358.5 | 0.6590 | 1.8144 | -65 |
| -64 | 12.18 | 0.0007 | 1.3850 | 1481.8 | 0.722 | 119.2 | 239.9 | 359.2 | 0.6647 | 1.8119 | -64 |
| -63 | 13.03 | 0.0007 | 1.3004 | 1479.0 | 0.769 | 120.4 | 239.4 | 359.8 | 0.6704 | 1.8095 | -63 |
| -62 | 13.93 | 0.0007 | 1.2210 | 1476.3 | 0.819 | 121.6 | 238.8 | 360.4 | 0.6760 | 1.8071 | -62 |
| -61 | 14.88 | 0.0007 | 1.1481 | 1473.5 | 0.871 | 122.8 | 238.2 | 361.0 | 0.6817 | 1.8047 | -61 |
| -60 | 15.89 | 0.0007 | 1.0799 | 1470.7 | 0.926 | 124.0 | 237.7 | 361.7 | 0.6873 | 1.8024 | -60 |
| -59 | 16.95 | 0.0007 | 1.0163 | 1468.0 | 0.984 | 125.2 | 237.1 | 362.3 | 0.6929 | 1.8001 | -59 |
| -58 | 18.07 | 0.0007 | 0.9579 | 1465.2 | 1.044 | 126.4 | 236.5 | 362.9 | 0.6985 | 1.7979 | -58 |
| -57 | 19.25 | 0.0007 | 0.9025 | 1462.4 | 1.108 | 127.6 | 236.0 | 363.6 | 0.7041 | 1.7958 | -57 |
| -56 | 20.49 | 0.0007 | 0.8511 | 1459.6 | 1.175 | 128.8 | 235.4 | 364.2 | 0.7097 | 1.7937 | -56 |
| -55 | 21.80 | 0.0007 | 0.8032 | 1456.9 | 1.245 | 130.0 | 234.8 | 364.8 | 0.7152 | 1.7916 | -55 |
| -54 | 23.17 | 0.0007 | 0.7587 | 1454.1 | 1.318 | 131.2 | 234.2 | 365.4 | 0.7208 | 1.7896 | -54 |
| -53 | 24.62 | 0.0007 | 0.7168 | 1451.3 | 1.395 | 132.4 | 233.6 | 366.1 | 0.7263 | 1.7876 | -53 |
| -52 | 26.14 | 0.0007 | 0.6775 | 1448.5 | 1.476 | 133.7 | 233.1 | 366.7 | 0.7318 | 1.7857 | -52 |
| -51 | 27.73 | 0.0007 | 0.6410 | 1445.7 | 1.560 | 134.9 | 232.5 | 367.3 | 0.7373 | 1.7838 | -51 |
| -50 | 29.41 | 0.0007 | 0.6068 | 1442.9 | 1.648 | 136.1 | 231.9 | 368.0 | 0.7428 | 1.7819 | -50 |
| -49 | 31.16 | 0.0007 | 0.5747 | 1440.1 | 1.740 | 137.3 | 231.3 | 368.6 | 0.7482 | 1.7801 | -49 |
| -48 | 33.00 | 0.0007 | 0.5447 | 1437.3 | 1.836 | 138.5 | 230.7 | 369.2 | 0.7537 | 1.7783 | -48 |
| -47 | 34.93 | 0.0007 | 0.5165 | 1434.5 | 1.936 | 139.8 | 230.1 | 369.9 | 0.7591 | 1.7766 | -47 |
| -46 | 36.95 | 0.0007 | 0.4902 | 1431.6 | 2.040 | 141.0 | 229.5 | 370.5 | 0.7645 | 1.7749 | -46 |
| -45 | 39.06 | 0.0007 | 0.4653 | 1428.8 | 2.149 | 142.2 | 228.9 | 371.1 | 0.7699 | 1.7732 | -45 |
| -44 | 41.27 | 0.0007 | 0.4419 | 1426.0 | 2.263 | 143.5 | 228.3 | 371.8 | 0.7753 | 1.7716 | -44 |
| -43 | 43.58 | 0.0007 | 0.4198 | 1423.2 | 2.382 | 144.7 | 227.7 | 372.4 | 0.7806 | 1.77 | -43 |
| -42 | 45.99 | 0.0007 | 0.3992 | 1420.3 | 2.505 | 145.9 | 227.1 | 373.0 | 0.7860 | 1.7685 | -42 |
| -41 | 48.51 | 0.0007 | 0.3798 | 1417.5 | 2.633 | 147.2 | 226.5 | 373.7 | 0.7913 | 1.767 | -41 |
| -40 | 51.14 | 0.0007 | 0.3614 | 1414.6 | 2.767 | 148.4 | 225.9 | 374.3 | 0.7967 | 1.7655 | -40 |

Annexes

Table 1. Freon™ 134a Saturation Properties—Temperature Table (continued)

| Temp [°C] | Pressure kPa (abs) | Volume [m ³ /kg] | | Density [kg/m ³] | | Enthalpy [kJ/kg] | | | Entropy [kJ/(kg)(K)] | | Temp [°C] |
|-----------|-----------------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------|----------------------|-------------|-----------|
| | | Liquid v_f | Vapor v_g | Liquid $1/v_f$ | Vapor $1/v_g$ | Liquid h_f | Latent h_{fg} | Vapor h_g | Liquid s_f | Vapor s_g | |
| -39 | 53.88 | 0.0007 | 0.3441 | 1411.8 | 2.906 | 149.6 | 225.3 | 374.9 | 0.8020 | 1.7641 | -39 |
| -38 | 56.74 | 0.0007 | 0.3279 | 1408.9 | 3.050 | 150.9 | 224.7 | 375.5 | 0.8073 | 1.7627 | -38 |
| -37 | 59.72 | 0.0007 | 0.3125 | 1406.0 | 3.200 | 152.1 | 224.0 | 376.2 | 0.8126 | 1.7613 | -37 |
| -36 | 62.83 | 0.0007 | 0.2980 | 1403.1 | 3.356 | 153.4 | 223.4 | 376.8 | 0.8178 | 1.7599 | -36 |
| -35 | 66.07 | 0.0007 | 0.2843 | 1400.2 | 3.518 | 154.6 | 222.8 | 377.4 | 0.8231 | 1.7586 | -35 |
| -34 | 69.43 | 0.0007 | 0.2713 | 1397.4 | 3.686 | 155.9 | 222.2 | 378.1 | 0.8283 | 1.7573 | -34 |
| -33 | 72.93 | 0.0007 | 0.2590 | 1394.5 | 3.861 | 157.1 | 221.5 | 378.7 | 0.8336 | 1.7561 | -33 |
| -32 | 76.58 | 0.0007 | 0.2474 | 1391.5 | 4.042 | 158.4 | 220.9 | 379.3 | 0.8388 | 1.7548 | -32 |
| -31 | 80.36 | 0.0007 | 0.2365 | 1388.6 | 4.229 | 159.7 | 220.3 | 379.9 | 0.8440 | 1.7536 | -31 |
| -30 | 84.29 | 0.0007 | 0.2260 | 1385.7 | 4.424 | 160.9 | 219.6 | 380.6 | 0.8492 | 1.7525 | -30 |
| -29 | 88.37 | 0.0007 | 0.2162 | 1382.8 | 4.625 | 162.2 | 219.0 | 381.2 | 0.8544 | 1.7513 | -29 |
| -28 | 92.61 | 0.0007 | 0.2069 | 1379.8 | 4.833 | 163.5 | 218.3 | 381.8 | 0.8595 | 1.7502 | -28 |
| -27 | 97.02 | 0.0007 | 0.1981 | 1376.9 | 5.049 | 164.7 | 217.7 | 382.4 | 0.8647 | 1.7491 | -27 |
| -26 | 101.58 | 0.0007 | 0.1896 | 1373.9 | 5.273 | 166.0 | 217.1 | 383.1 | 0.8698 | 1.7481 | -26 |
| -25 | 106.32 | 0.0007 | 0.1817 | 1371.0 | 5.504 | 167.3 | 216.4 | 383.7 | 0.8750 | 1.747 | -25 |
| -24 | 111.22 | 0.0007 | 0.1741 | 1368.0 | 5.743 | 168.6 | 215.7 | 384.3 | 0.8801 | 1.746 | -24 |
| -23 | 116.31 | 0.0007 | 0.1669 | 1365.0 | 5.991 | 169.8 | 215.1 | 384.9 | 0.8852 | 1.745 | -23 |
| -22 | 121.57 | 0.0007 | 0.1601 | 1362.0 | 6.247 | 171.1 | 214.4 | 385.5 | 0.8903 | 1.744 | -22 |
| -21 | 127.02 | 0.0007 | 0.1536 | 1359.0 | 6.511 | 172.4 | 213.7 | 386.2 | 0.8954 | 1.7431 | -21 |
| -20 | 132.67 | 0.0007 | 0.1474 | 1356.0 | 6.784 | 173.7 | 213.1 | 386.8 | 0.9005 | 1.7422 | -20 |
| -19 | 138.50 | 0.0007 | 0.1415 | 1353.0 | 7.066 | 175.0 | 212.4 | 387.4 | 0.9055 | 1.7413 | -19 |
| -18 | 144.54 | 0.0007 | 0.1359 | 1349.9 | 7.357 | 176.3 | 211.7 | 388.0 | 0.9106 | 1.7404 | -18 |
| -17 | 150.78 | 0.0007 | 0.1306 | 1346.9 | 7.658 | 177.6 | 211.0 | 388.6 | 0.9157 | 1.7395 | -17 |
| -16 | 157.23 | 0.0007 | 0.1255 | 1343.8 | 7.968 | 178.9 | 210.4 | 389.2 | 0.9207 | 1.7387 | -16 |
| -15 | 163.90 | 0.0007 | 0.1207 | 1340.8 | 8.288 | 180.2 | 209.7 | 389.8 | 0.9257 | 1.7379 | -15 |
| -14 | 170.78 | 0.0007 | 0.1160 | 1337.7 | 8.618 | 181.5 | 209.0 | 390.4 | 0.9307 | 1.7371 | -14 |
| -13 | 177.89 | 0.0007 | 0.1116 | 1334.6 | 8.958 | 182.8 | 208.3 | 391.1 | 0.9357 | 1.7363 | -13 |
| -12 | 185.22 | 0.0008 | 0.1074 | 1331.5 | 9.309 | 184.1 | 207.6 | 391.7 | 0.9407 | 1.7356 | -12 |
| -11 | 192.79 | 0.0008 | 0.1034 | 1328.4 | 9.671 | 185.4 | 206.9 | 392.3 | 0.9457 | 1.7348 | -11 |
| -10 | 200.60 | 0.0008 | 0.0996 | 1325.3 | 10.044 | 186.7 | 206.2 | 392.9 | 0.9507 | 1.7341 | -10 |
| -9 | 208.65 | 0.0008 | 0.0959 | 1322.1 | 10.428 | 188.0 | 205.4 | 393.5 | 0.9557 | 1.7334 | -9 |
| -8 | 216.95 | 0.0008 | 0.0924 | 1319.0 | 10.823 | 189.3 | 204.7 | 394.1 | 0.9606 | 1.7327 | -8 |
| -7 | 225.50 | 0.0008 | 0.0890 | 1315.8 | 11.231 | 190.7 | 204.0 | 394.7 | 0.9656 | 1.7321 | -7 |
| -6 | 234.32 | 0.0008 | 0.0858 | 1312.6 | 11.650 | 192.0 | 203.3 | 395.3 | 0.9705 | 1.7314 | -6 |
| -5 | 243.39 | 0.0008 | 0.0828 | 1309.4 | 12.082 | 193.3 | 202.5 | 395.9 | 0.9755 | 1.7308 | -5 |
| -4 | 252.74 | 0.0008 | 0.0798 | 1306.2 | 12.526 | 194.6 | 201.8 | 396.4 | 0.9804 | 1.7302 | -4 |
| -3 | 262.36 | 0.0008 | 0.0770 | 1303.0 | 12.983 | 196.0 | 201.1 | 397.0 | 0.9853 | 1.7295 | -3 |
| -2 | 272.26 | 0.0008 | 0.0743 | 1299.8 | 13.454 | 197.3 | 200.3 | 397.6 | 0.9902 | 1.729 | -2 |
| -1 | 282.45 | 0.0008 | 0.0718 | 1296.5 | 13.937 | 198.7 | 199.6 | 398.2 | 0.9951 | 1.7284 | -1 |
| 0 | 292.93 | 0.0008 | 0.0693 | 1293.3 | 14.435 | 200.0 | 198.8 | 398.8 | 1.0000 | 1.7278 | 0 |
| 1 | 303.70 | 0.0008 | 0.0669 | 1290.0 | 14.946 | 201.3 | 198.0 | 399.4 | 1.0049 | 1.7273 | 1 |
| 2 | 314.77 | 0.0008 | 0.0646 | 1286.7 | 15.472 | 202.7 | 197.3 | 400.0 | 1.0098 | 1.7267 | 2 |
| 3 | 326.16 | 0.0008 | 0.0624 | 1283.4 | 16.013 | 204.0 | 196.5 | 400.5 | 1.0146 | 1.7262 | 3 |
| 4 | 337.85 | 0.0008 | 0.0604 | 1280.1 | 16.569 | 205.4 | 195.7 | 401.1 | 1.0195 | 1.7257 | 4 |
| 5 | 349.87 | 0.0008 | 0.0583 | 1276.7 | 17.140 | 206.8 | 194.9 | 401.7 | 1.0244 | 1.7252 | 5 |
| 6 | 362.21 | 0.0008 | 0.0564 | 1273.4 | 17.726 | 208.1 | 194.2 | 402.3 | 1.0292 | 1.7247 | 6 |
| 7 | 374.88 | 0.0008 | 0.0546 | 1270.0 | 18.329 | 209.5 | 193.4 | 402.8 | 1.0340 | 1.7242 | 7 |
| 8 | 387.88 | 0.0008 | 0.0528 | 1266.6 | 18.948 | 210.8 | 192.6 | 403.4 | 1.0389 | 1.7238 | 8 |
| 9 | 401.23 | 0.0008 | 0.0511 | 1263.2 | 19.583 | 212.2 | 191.8 | 404.0 | 1.0437 | 1.7233 | 9 |
| 10 | 414.92 | 0.0008 | 0.0494 | 1259.8 | 20.236 | 213.6 | 190.9 | 404.5 | 1.0485 | 1.7229 | 10 |
| 11 | 428.97 | 0.0008 | 0.0478 | 1256.3 | 20.906 | 215.0 | 190.1 | 405.1 | 1.0533 | 1.7224 | 11 |
| 12 | 443.37 | 0.0008 | 0.0463 | 1252.9 | 21.594 | 216.4 | 189.3 | 405.6 | 1.0582 | 1.722 | 12 |
| 13 | 458.11 | 0.0008 | 0.0448 | 1249.4 | 22.301 | 217.7 | 188.5 | 406.2 | 1.0630 | 1.7216 | 13 |
| 14 | 473.25 | 0.0008 | 0.0434 | 1245.9 | 23.026 | 219.1 | 187.6 | 406.8 | 1.0678 | 1.7212 | 14 |
| 15 | 488.78 | 0.0008 | 0.0421 | 1242.3 | 23.770 | 220.5 | 186.8 | 407.3 | 1.0726 | 1.7208 | 15 |
| 16 | 504.68 | 0.0008 | 0.0408 | 1238.8 | 24.533 | 221.9 | 185.9 | 407.8 | 1.0773 | 1.7204 | 16 |
| 17 | 520.98 | 0.0008 | 0.0395 | 1235.2 | 25.317 | 223.3 | 185.1 | 408.4 | 1.0821 | 1.72 | 17 |
| 18 | 537.67 | 0.0008 | 0.0383 | 1231.6 | 26.121 | 224.7 | 184.2 | 408.9 | 1.0869 | 1.7196 | 18 |
| 19 | 554.76 | 0.0008 | 0.0371 | 1228.0 | 26.945 | 226.1 | 183.3 | 409.5 | 1.0917 | 1.7192 | 19 |
| 20 | 572.25 | 0.0008 | 0.0360 | 1224.4 | 27.791 | 227.5 | 182.5 | 410.0 | 1.0964 | 1.7189 | 20 |
| 21 | 590.16 | 0.0008 | 0.0349 | 1220.7 | 28.659 | 228.9 | 181.6 | 410.5 | 1.1012 | 1.7185 | 21 |

Annexes

Table 2. Freon™ 134a Superheated Vapor—Constant Pressure Table (continued)

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg)(K) v_s = Velocity of Sound in m/sec
 C_p = Heat Capacity at Constant Pressure in kJ/(kg)(°C) C_p/C_v = Heat Capacity Ratio (Dimensionless)

| Temp [°C] | Pressure = 140.00 kPa (abs) | | | | | | | Pressure = 150.00 kPa (abs) | | | | | | Temp [°C] |
|-----------|-----------------------------|-------|--------|----------------|--------------------------------|----------------|---------|-----------------------------|-------|--------|----------------|--------------------------------|----------------|-----------|
| | V | H | S | C _p | C _p /C _v | v _s | | V | H | S | C _p | C _p /C _v | v _s | |
| -18.75 | 0.00074 | 175.3 | 0.9068 | 1.2899 | 1.5072 | 711.2 | SAT LIQ | 0.00074 | 177.4 | 0.9150 | 1.2939 | 1.5081 | 703.7 | -17.12 |
| -18.75 | 0.14010 | 387.5 | 1.7411 | 0.8142 | 1.1587 | 146.4 | SAT VAP | 0.13123 | 388.5 | 1.7397 | 0.8201 | 1.1599 | 146.5 | -17.12 |
| -15 | 0.14263 | 390.6 | 1.7530 | 0.8166 | 1.1545 | 147.7 | | 0.13259 | 390.3 | 1.7464 | 0.8213 | 1.1574 | 147.3 | -15 |
| -10 | 0.14599 | 394.7 | 1.7687 | 0.8205 | 1.1493 | 149.5 | | 0.13576 | 394.4 | 1.7622 | 0.8247 | 1.1519 | 149.1 | -10 |
| -5 | 0.14930 | 398.8 | 1.7842 | 0.8250 | 1.1447 | 151.2 | | 0.13889 | 398.5 | 1.7778 | 0.8287 | 1.1470 | 150.8 | -5 |
| 0 | 0.15258 | 402.9 | 1.7995 | 0.8299 | 1.1405 | 152.8 | | 0.14196 | 402.7 | 1.7931 | 0.8333 | 1.1426 | 152.4 | 0 |
| 5 | 0.15584 | 407.1 | 1.8146 | 0.8353 | 1.1368 | 154.4 | | 0.14503 | 406.9 | 1.8083 | 0.8384 | 1.1386 | 154.1 | 5 |
| 10 | 0.15906 | 411.3 | 1.8295 | 0.8411 | 1.1333 | 156.0 | | 0.14806 | 411.1 | 1.8233 | 0.8438 | 1.1350 | 155.7 | 10 |
| 15 | 0.16226 | 415.5 | 1.8443 | 0.8471 | 1.1301 | 157.5 | | 0.15106 | 415.3 | 1.8381 | 0.8496 | 1.1316 | 157.2 | 15 |
| 20 | 0.16543 | 419.8 | 1.8589 | 0.8534 | 1.1272 | 159.0 | | 0.15404 | 419.6 | 1.8528 | 0.8557 | 1.1285 | 158.7 | 20 |
| 25 | 0.16858 | 424.1 | 1.8734 | 0.8599 | 1.1245 | 160.5 | | 0.15701 | 423.9 | 1.8673 | 0.8620 | 1.1257 | 160.2 | 25 |
| 30 | 0.17173 | 428.4 | 1.8877 | 0.8666 | 1.1219 | 162.0 | | 0.15995 | 428.2 | 1.8817 | 0.8685 | 1.1231 | 161.7 | 30 |
| 35 | 0.17486 | 432.7 | 1.9020 | 0.8735 | 1.1196 | 163.4 | | 0.16289 | 432.5 | 1.8959 | 0.8752 | 1.1206 | 163.2 | 35 |
| 40 | 0.17794 | 437.1 | 1.9161 | 0.8804 | 1.1174 | 164.8 | | 0.16581 | 436.9 | 1.9101 | 0.8820 | 1.1183 | 164.6 | 40 |
| 45 | 0.18106 | 441.5 | 1.9301 | 0.8875 | 1.1153 | 166.2 | | 0.16869 | 441.4 | 1.9241 | 0.8890 | 1.1162 | 166.0 | 45 |
| 50 | 0.18413 | 446.0 | 1.9440 | 0.8946 | 1.1134 | 167.6 | | 0.17156 | 445.8 | 1.9380 | 0.8960 | 1.1142 | 167.4 | 50 |
| 55 | 0.18720 | 450.5 | 1.9578 | 0.9019 | 1.1115 | 168.9 | | 0.17449 | 450.3 | 1.9518 | 0.9032 | 1.1123 | 168.7 | 55 |
| 60 | 0.19026 | 455.0 | 1.9715 | 0.9091 | 1.1098 | 170.3 | | 0.17734 | 454.9 | 1.9656 | 0.9103 | 1.1105 | 170.1 | 60 |
| 65 | 0.19331 | 459.6 | 1.9851 | 0.9165 | 1.1082 | 171.6 | | 0.18018 | 459.4 | 1.9792 | 0.9176 | 1.1088 | 171.4 | 65 |
| 70 | 0.19635 | 464.2 | 1.9986 | 0.9238 | 1.1066 | 172.9 | | 0.18305 | 464.0 | 1.9927 | 0.9249 | 1.1072 | 172.8 | 70 |
| 75 | 0.19936 | 468.8 | 2.0120 | 0.9312 | 1.1051 | 174.2 | | 0.18587 | 468.7 | 2.0061 | 0.9322 | 1.1057 | 174.1 | 75 |
| 80 | 0.20243 | 473.5 | 2.0253 | 0.9386 | 1.1037 | 175.5 | | 0.18875 | 473.4 | 2.0195 | 0.9395 | 1.1043 | 175.3 | 80 |
| 85 | 0.20547 | 478.2 | 2.0386 | 0.9460 | 1.1024 | 176.8 | | 0.19157 | 478.1 | 2.0327 | 0.9468 | 1.1029 | 176.6 | 85 |
| 90 | 0.20851 | 482.9 | 2.0517 | 0.9534 | 1.1011 | 178.0 | | 0.19440 | 482.8 | 2.0459 | 0.9541 | 1.1016 | 177.9 | 90 |
| 95 | 0.21146 | 487.7 | 2.0648 | 0.9607 | 1.0998 | 179.3 | | 0.19720 | 487.6 | 2.0590 | 0.9615 | 1.1003 | 179.1 | 95 |
| 100 | 0.21450 | 492.5 | 2.0778 | 0.9681 | 1.0987 | 180.5 | | 0.20000 | 492.4 | 2.0720 | 0.9688 | 1.0991 | 180.4 | 100 |
| 105 | 0.21753 | 497.4 | 2.0908 | 0.9755 | 1.0975 | 181.7 | | 0.20284 | 497.3 | 2.0850 | 0.9761 | 1.0979 | 181.6 | 105 |
| 110 | 0.22051 | 502.3 | 2.1036 | 0.9828 | 1.0964 | 182.9 | | 0.20563 | 502.2 | 2.0978 | 0.9834 | 1.0968 | 182.8 | 110 |
| 115 | 0.22351 | 507.2 | 2.1164 | 0.9901 | 1.0954 | 184.1 | | 0.20846 | 507.1 | 2.1106 | 0.9907 | 1.0958 | 184.0 | 115 |
| 120 | 0.22650 | 512.2 | 2.1291 | 0.9974 | 1.0944 | 185.3 | | 0.21124 | 512.1 | 2.1234 | 0.9979 | 1.0947 | 185.2 | 120 |
| 125 | 0.22946 | 517.2 | 2.1418 | 1.0046 | 1.0934 | 186.5 | | 0.21404 | 517.1 | 2.1360 | 1.0052 | 1.0937 | 186.4 | 125 |
| 130 | 0.23245 | 522.2 | 2.1544 | 1.0118 | 1.0925 | 187.7 | | 0.21683 | 522.2 | 2.1486 | 1.0123 | 1.0928 | 187.6 | 130 |
| 135 | 0.23546 | 527.3 | 2.1669 | 1.0190 | 1.0916 | 188.8 | | 0.21964 | 527.2 | 2.1611 | 1.0195 | 1.0919 | 188.7 | 135 |

Annexes

Table 2. Freon™ 134a Superheated Vapor—Constant Pressure Table (continued)

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg)(K) v_s = Velocity of Sound in m/sec
 C_p = Heat Capacity at Constant Pressure in kJ/(kg)(°C) C_p/C_v = Heat Capacity Ratio (Dimensionless)

| Temp [°C] | Pressure = 1100.00 kPa (abs) | | | | | | | Pressure = 1200.00 kPa (abs) | | | | | | Temp [°C] |
|--------------|------------------------------|-------|--------|----------------|--------------------------------|----------------|---------|------------------------------|-------|--------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------|
| | V | H | S | C _p | C _p /C _v | v _s | | V | H | S | C _p | C _p /C _v | v _s | |
| 42.93 | 0.00088 | 261.0 | 1.2050 | 1.5256 | 1.6158 | 424.9 | SAT LIQ | 0.00089 | 266.2 | 1.2208 | 1.5481 | 1.6300 | 408.8 | 46.28 |
| 42.93 | 0.01839 | 421.0 | 1.7112 | 1.1488 | 1.3000 | 139.4 | SAT VAP | 0.01674 | 422.4 | 1.7100 | 1.1807 | 1.3195 | 138.1 | 46.28 |
| 45 | 0.01867 | 423.4 | 1.7186 | 1.1368 | 1.2876 | 140.8 | | — | — | — | — | — | — | 45 |
| 50 | 0.01932 | 429.0 | 1.7362 | 1.1131 | 1.2623 | 143.9 | | 0.01722 | 426.8 | 1.7235 | 1.1563 | 1.2951 | 140.7 | 50 |
| 55 | 0.01995 | 434.5 | 1.7531 | 1.0952 | 1.2419 | 146.8 | | 0.01783 | 432.5 | 1.7411 | 1.1310 | 1.2685 | 143.9 | 55 |
| 60 | 0.02054 | 440.0 | 1.7696 | 1.0817 | 1.2251 | 149.5 | | 0.01842 | 438.1 | 1.7580 | 1.1119 | 1.2471 | 146.9 | 60 |
| 65 | 0.02112 | 445.4 | 1.7856 | 1.0716 | 1.2110 | 152.1 | | 0.01897 | 443.6 | 1.7745 | 1.0974 | 1.2296 | 149.7 | 65 |
| 70 | 0.02168 | 450.7 | 1.8013 | 1.0640 | 1.1990 | 154.5 | | 0.01951 | 449.1 | 1.7905 | 1.0864 | 1.2149 | 152.3 | 70 |
| 75 | 0.02223 | 456.0 | 1.8166 | 1.0586 | 1.1887 | 156.8 | | 0.02003 | 454.5 | 1.8062 | 1.0782 | 1.2025 | 154.8 | 75 |
| 80 | 0.02275 | 461.3 | 1.8317 | 1.0548 | 1.1797 | 159.1 | | 0.02054 | 459.8 | 1.8215 | 1.0722 | 1.1918 | 157.1 | 80 |
| 85 | 0.02327 | 466.6 | 1.8465 | 1.0525 | 1.1718 | 161.2 | | 0.02103 | 465.2 | 1.8365 | 1.0679 | 1.1825 | 159.3 | 85 |
| 90 | 0.02378 | 471.8 | 1.8611 | 1.0513 | 1.1648 | 163.2 | | 0.02151 | 470.5 | 1.8513 | 1.0652 | 1.1743 | 161.5 | 90 |
| 95 | 0.02428 | 477.1 | 1.8755 | 1.0511 | 1.1585 | 165.2 | | 0.02199 | 475.8 | 1.8659 | 1.0636 | 1.1671 | 163.6 | 95 |
| 100 | 0.02477 | 482.3 | 1.8897 | 1.0517 | 1.1529 | 167.1 | | 0.02245 | 481.2 | 1.8802 | 1.0630 | 1.1607 | 165.6 | 100 |
| 105 | 0.02525 | 487.6 | 1.9037 | 1.0530 | 1.1479 | 168.9 | | 0.02290 | 486.5 | 1.8944 | 1.0633 | 1.1549 | 167.5 | 105 |
| 110 | 0.02573 | 492.9 | 1.9175 | 1.0549 | 1.1433 | 170.7 | | 0.02335 | 491.8 | 1.9083 | 1.0644 | 1.1497 | 169.4 | 110 |
| 115 | 0.02620 | 498.1 | 1.9312 | 1.0573 | 1.1391 | 172.5 | | 0.02379 | 497.1 | 1.9221 | 1.0660 | 1.1450 | 171.2 | 115 |
| 120 | 0.02666 | 503.4 | 1.9447 | 1.0602 | 1.1353 | 174.2 | | 0.02423 | 502.5 | 1.9358 | 1.0682 | 1.1407 | 173.0 | 120 |
| 125 | 0.02713 | 508.7 | 1.9582 | 1.0634 | 1.1318 | 175.9 | | 0.02466 | 507.8 | 1.9493 | 1.0708 | 1.1368 | 174.7 | 125 |
| 130 | 0.02758 | 514.1 | 1.9715 | 1.0670 | 1.1285 | 177.5 | | 0.02508 | 513.2 | 1.9627 | 1.0739 | 1.1331 | 176.4 | 130 |
| 135 | 0.02803 | 519.4 | 1.9846 | 1.0709 | 1.1255 | 179.1 | | 0.02550 | 518.5 | 1.9760 | 1.0773 | 1.1298 | 178.0 | 135 |
| 140 | 0.02848 | 524.8 | 1.9977 | 1.0750 | 1.1227 | 180.6 | | 0.02592 | 523.9 | 1.9891 | 1.0810 | 1.1267 | 179.6 | 140 |
| 145 | 0.02892 | 530.2 | 2.0106 | 1.0793 | 1.1201 | 182.2 | | 0.02633 | 529.4 | 2.0021 | 1.0849 | 1.1239 | 181.2 | 145 |
| 150 | 0.02936 | 535.6 | 2.0235 | 1.0838 | 1.1177 | 183.7 | | 0.02675 | 534.8 | 2.0150 | 1.0890 | 1.1212 | 182.8 | 150 |
| 155 | 0.02980 | 541.0 | 2.0363 | 1.0885 | 1.1154 | 185.2 | | 0.02715 | 540.2 | 2.0279 | 1.0934 | 1.1187 | 184.3 | 155 |
| 160 | 0.03023 | 546.5 | 2.0489 | 1.0933 | 1.1133 | 186.6 | | 0.02756 | 545.7 | 2.0406 | 1.0979 | 1.1164 | 185.8 | 160 |
| 165 | 0.03067 | 551.9 | 2.0615 | 1.0982 | 1.1113 | 188.0 | | 0.02796 | 551.2 | 2.0532 | 1.1026 | 1.1142 | 187.2 | 165 |
| 170 | 0.03110 | 557.4 | 2.0740 | 1.1033 | 1.1094 | 189.5 | | 0.02836 | 556.8 | 2.0657 | 1.1074 | 1.1122 | 188.7 | 170 |
| 175 | 0.03152 | 563.0 | 2.0864 | 1.1084 | 1.1076 | 190.8 | | 0.02875 | 562.3 | 2.0782 | 1.1123 | 1.1102 | 190.1 | 175 |
| 180 | 0.03194 | 568.5 | 2.0987 | 1.1136 | 1.1059 | 192.2 | | 0.02915 | 567.9 | 2.0906 | 1.1173 | 1.1084 | 191.5 | 180 |
| 185 | 0.03237 | 574.1 | 2.1110 | 1.1188 | 1.1043 | 193.6 | | 0.02954 | 573.5 | 2.1029 | 1.1223 | 1.1067 | 192.9 | 185 |
| 190 | 0.03279 | 579.7 | 2.1231 | 1.1241 | 1.1028 | 194.9 | | 0.02993 | 579.1 | 2.1151 | 1.1275 | 1.1050 | 194.2 | 190 |
| 195 | 0.03321 | 585.3 | 2.1353 | 1.1295 | 1.1013 | 196.2 | | 0.03032 | 584.7 | 2.1272 | 1.1326 | 1.1035 | 195.6 | 195 |
| 200 | — | — | — | — | — | — | | 0.03070 | 590.4 | 2.1393 | 1.1379 | 1.1020 | 196.9 | 200 |

Annexe 05: Table R717

Tables in SI Units 743

TABLE A-18 Properties of Superheated Ammonia Vapor

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

Ammonia

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

| Temp. °C | Press. bar | Specific Volume m ³ /kg | | Internal Energy kJ/kg | | Enthalpy kJ/kg | | | Entropy kJ/kg · K | | Temp. °C |
|-------------|---------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|
| | | Sat. Liquid $v_f \times 10^3$ | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Sat. Vapor u_g | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Sat. Vapor s_g | |
| -50 | 0.4086 | 1.4245 | 2.6265 | -43.94 | 1264.99 | -43.88 | 1416.20 | 1372.32 | -0.1922 | 6.1543 | -50 |
| -45 | 0.5453 | 1.4367 | 2.0060 | -22.03 | 1271.19 | -21.95 | 1402.52 | 1380.57 | -0.0951 | 6.0523 | -45 |
| -40 | 0.7174 | 1.4493 | 1.5524 | -0.10 | 1277.20 | 0.00 | 1388.56 | 1388.56 | 0.0000 | 5.9557 | -40 |
| -36 | 0.8850 | 1.4597 | 1.2757 | 17.47 | 1281.87 | 17.60 | 1377.17 | 1394.77 | 0.0747 | 5.8819 | -36 |
| -32 | 1.0832 | 1.4703 | 1.0561 | 35.09 | 1286.41 | 35.25 | 1365.55 | 1400.81 | 0.1484 | 5.8111 | -32 |
| -30 | 1.1950 | 1.4757 | 0.9634 | 43.93 | 1288.63 | 44.10 | 1359.65 | 1403.75 | 0.1849 | 5.7767 | -30 |
| -28 | 1.3159 | 1.4812 | 0.8803 | 52.78 | 1290.82 | 52.97 | 1353.68 | 1406.66 | 0.2212 | 5.7430 | -28 |
| -26 | 1.4465 | 1.4867 | 0.8056 | 61.65 | 1292.97 | 61.86 | 1347.65 | 1409.51 | 0.2572 | 5.7100 | -26 |
| -22 | 1.7390 | 1.4980 | 0.6780 | 79.46 | 1297.18 | 79.72 | 1335.36 | 1415.08 | 0.3287 | 5.6457 | -22 |
| -20 | 1.9019 | 1.5038 | 0.6233 | 88.40 | 1299.23 | 88.68 | 1329.10 | 1417.79 | 0.3642 | 5.6144 | -20 |
| -18 | 2.0769 | 1.5096 | 0.5739 | 97.36 | 1301.25 | 97.68 | 1322.77 | 1420.45 | 0.3994 | 5.5837 | -18 |
| -16 | 2.2644 | 1.5155 | 0.5291 | 106.36 | 1303.23 | 106.70 | 1316.35 | 1423.05 | 0.4346 | 5.5536 | -16 |
| -14 | 2.4632 | 1.5215 | 0.4885 | 115.37 | 1305.17 | 115.75 | 1309.86 | 1425.61 | 0.4695 | 5.5239 | -14 |
| -12 | 2.6798 | 1.5276 | 0.4516 | 124.42 | 1307.08 | 124.83 | 1303.28 | 1428.11 | 0.5043 | 5.4948 | -12 |
| -10 | 2.9089 | 1.5338 | 0.4180 | 133.50 | 1308.95 | 133.94 | 1296.61 | 1430.55 | 0.5389 | 5.4662 | -10 |
| -8 | 3.1532 | 1.5400 | 0.3874 | 142.60 | 1310.78 | 143.09 | 1289.86 | 1432.95 | 0.5734 | 5.4380 | -8 |
| -6 | 3.4134 | 1.5464 | 0.3595 | 151.74 | 1312.57 | 152.26 | 1283.02 | 1435.28 | 0.6077 | 5.4103 | -6 |
| -4 | 3.6901 | 1.5528 | 0.3340 | 160.88 | 1314.32 | 161.46 | 1276.10 | 1437.56 | 0.6418 | 5.3831 | -4 |
| -2 | 3.9842 | 1.5594 | 0.3106 | 170.07 | 1316.04 | 170.69 | 1269.08 | 1439.78 | 0.6759 | 5.3562 | -2 |
| 0 | 4.2962 | 1.5660 | 0.2892 | 179.29 | 1317.71 | 179.96 | 1261.97 | 1441.94 | 0.7097 | 5.3298 | 0 |
| 2 | 4.6270 | 1.5727 | 0.2695 | 188.53 | 1319.34 | 189.26 | 1254.77 | 1444.03 | 0.7435 | 5.3038 | 2 |
| 4 | 4.9773 | 1.5796 | 0.2514 | 197.80 | 1320.92 | 198.59 | 1247.48 | 1446.07 | 0.7770 | 5.2781 | 4 |
| 6 | 5.3479 | 1.5866 | 0.2348 | 207.10 | 1322.47 | 207.95 | 1240.09 | 1448.04 | 0.8105 | 5.2529 | 6 |
| 8 | 5.7395 | 1.5936 | 0.2195 | 216.42 | 1323.96 | 217.34 | 1232.61 | 1449.94 | 0.8438 | 5.2279 | 8 |
| 10 | 6.1529 | 1.6008 | 0.2054 | 225.77 | 1325.42 | 226.75 | 1225.03 | 1451.78 | 0.8769 | 5.2033 | 10 |
| 12 | 6.5890 | 1.6081 | 0.1923 | 235.14 | 1326.82 | 236.20 | 1217.35 | 1453.55 | 0.9099 | 5.1791 | 12 |
| 16 | 7.5324 | 1.6231 | 0.1691 | 253.95 | 1329.48 | 255.18 | 1201.70 | 1456.87 | 0.9755 | 5.1314 | 16 |
| 20 | 8.5762 | 1.6386 | 0.1492 | 272.86 | 1331.94 | 274.26 | 1185.64 | 1459.90 | 1.0404 | 5.0849 | 20 |
| 24 | 9.7274 | 1.6547 | 0.1320 | 291.84 | 1334.19 | 293.45 | 1169.16 | 1462.61 | 1.1048 | 5.0394 | 24 |
| 28 | 10.993 | 1.6714 | 0.1172 | 310.92 | 1336.20 | 312.75 | 1152.24 | 1465.00 | 1.1686 | 4.9948 | 28 |
| 32 | 12.380 | 1.6887 | 0.1043 | 330.07 | 1337.97 | 332.17 | 1134.87 | 1467.03 | 1.2319 | 4.9509 | 32 |
| 36 | 13.896 | 1.7068 | 0.0930 | 349.32 | 1339.47 | 351.69 | 1117.00 | 1468.70 | 1.2946 | 4.9078 | 36 |
| 40 | 15.549 | 1.7256 | 0.0831 | 368.67 | 1340.70 | 371.35 | 1098.62 | 1469.97 | 1.3569 | 4.8652 | 40 |
| 45 | 17.819 | 1.7503 | 0.0725 | 393.01 | 1341.81 | 396.13 | 1074.84 | 1470.96 | 1.4341 | 4.8125 | 45 |
| 50 | 20.331 | 1.7765 | 0.0634 | 417.56 | 1342.42 | 421.17 | 1050.09 | 1471.26 | 1.5109 | 4.7604 | 50 |

Ammonia

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

TABLE A-15 (Continued)

| T °C | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg·K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg·K |
|---|---------------------------|--------------|--------------|---|---------------------------|--------------|--------------|----------------|
| $p = 12.0 \text{ bar} = 1.20 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 30.94^\circ\text{C}$) | | | | $p = 14.0 \text{ bar} = 1.40 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.26^\circ\text{C}$) | | | | |
| Sat. | 0.10751 | 1337.52 | 1466.53 | 4.9625 | 0.09231 | 1339.56 | 1468.79 | 4.9050 |
| 40 | 0.11287 | 1359.73 | 1495.18 | 5.0553 | 0.09432 | 1349.29 | 1481.33 | 4.9453 |
| 60 | 0.12378 | 1404.54 | 1553.07 | 5.2347 | 0.10423 | 1396.97 | 1542.89 | 5.1360 |
| 80 | 0.13387 | 1445.91 | 1606.56 | 5.3906 | 0.11324 | 1440.06 | 1598.59 | 5.2984 |
| 100 | 0.14347 | 1485.55 | 1657.71 | 5.5315 | 0.12172 | 1480.79 | 1651.20 | 5.4433 |
| 120 | 0.15275 | 1524.41 | 1707.71 | 5.6620 | 0.12986 | 1520.41 | 1702.21 | 5.5765 |
| 140 | 0.16181 | 1563.09 | 1757.26 | 5.7850 | 0.13777 | 1559.63 | 1752.52 | 5.7013 |
| 160 | 0.17072 | 1601.95 | 1806.81 | 5.9021 | 0.14552 | 1598.92 | 1802.65 | 5.8198 |
| 180 | 0.17950 | 1641.23 | 1856.63 | 6.0145 | 0.15315 | 1638.53 | 1852.94 | 5.9333 |
| 200 | 0.18819 | 1681.05 | 1906.87 | 6.1230 | 0.16068 | 1678.64 | 1903.59 | 6.0427 |
| 220 | 0.19680 | 1721.50 | 1957.66 | 6.2282 | 0.16813 | 1719.35 | 1954.73 | 6.1485 |
| 240 | 0.20534 | 1762.63 | 2009.04 | 6.3303 | 0.17551 | 1760.72 | 2006.43 | 6.2513 |
| 260 | 0.21382 | 1804.48 | 2061.06 | 6.4297 | 0.18283 | 1802.78 | 2058.75 | 6.3513 |
| 280 | 0.22225 | 1847.04 | 2113.74 | 6.5267 | 0.19010 | 1845.55 | 2111.69 | 6.4488 |
| $p = 16.0 \text{ bar} = 1.60 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 41.03^\circ\text{C}$) | | | | $p = 18.0 \text{ bar} = 1.80 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 45.38^\circ\text{C}$) | | | | |
| Sat. | 0.08079 | 1340.97 | 1470.23 | 4.8542 | 0.07174 | 1341.88 | 1471.01 | 4.8086 |
| 60 | 0.08951 | 1389.06 | 1532.28 | 5.0461 | 0.07801 | 1380.77 | 1521.19 | 4.9627 |
| 80 | 0.09774 | 1434.02 | 1590.40 | 5.2196 | 0.08565 | 1427.79 | 1581.97 | 5.1399 |
| 100 | 0.10539 | 1475.93 | 1644.56 | 5.3648 | 0.09267 | 1470.97 | 1637.78 | 5.2937 |
| 120 | 0.11268 | 1516.34 | 1696.64 | 5.5008 | 0.09931 | 1512.22 | 1690.98 | 5.4326 |
| 140 | 0.11974 | 1556.14 | 1747.72 | 5.6276 | 0.10570 | 1552.61 | 1742.88 | 5.5614 |
| 160 | 0.12663 | 1595.85 | 1798.45 | 5.7475 | 0.11192 | 1592.76 | 1794.23 | 5.6828 |
| 180 | 0.13339 | 1635.81 | 1849.23 | 5.8621 | 0.11801 | 1633.08 | 1845.50 | 5.7985 |
| 200 | 0.14005 | 1676.21 | 1900.29 | 5.9723 | 0.12400 | 1673.78 | 1896.98 | 5.9096 |
| 220 | 0.14663 | 1717.18 | 1951.79 | 6.0789 | 0.12991 | 1715.00 | 1948.83 | 6.0170 |
| 240 | 0.15314 | 1758.79 | 2003.81 | 6.1823 | 0.13574 | 1756.85 | 2001.18 | 6.1210 |
| 260 | 0.15959 | 1801.07 | 2056.42 | 6.2829 | 0.14152 | 1799.35 | 2054.08 | 6.2222 |
| 280 | 0.16599 | 1844.05 | 2109.64 | 6.3809 | 0.14724 | 1842.55 | 2107.58 | 6.3207 |
| $p = 20.0 \text{ bar} = 2.00 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 49.37^\circ\text{C}$) | | | | | | | | |
| Sat. | 0.06445 | 1342.37 | 1471.26 | 4.7670 | | | | |
| 60 | 0.06875 | 1372.05 | 1509.54 | 4.8838 | | | | |
| 80 | 0.07596 | 1421.36 | 1575.27 | 5.0696 | | | | |
| 100 | 0.08248 | 1465.89 | 1630.86 | 5.2283 | | | | |
| 120 | 0.08861 | 1508.03 | 1685.24 | 5.3703 | | | | |
| 140 | 0.09447 | 1549.03 | 1737.98 | 5.5012 | | | | |
| 160 | 0.10016 | 1589.65 | 1789.97 | 5.6241 | | | | |
| 180 | 0.10571 | 1630.32 | 1841.74 | 5.7409 | | | | |
| 200 | 0.11116 | 1671.33 | 1893.64 | 5.8530 | | | | |
| 220 | 0.11652 | 1712.82 | 1945.87 | 5.9611 | | | | |
| 240 | 0.12182 | 1754.90 | 1998.54 | 6.0658 | | | | |
| 260 | 0.12706 | 1797.63 | 2051.74 | 6.1675 | | | | |
| 280 | 0.13224 | 1841.03 | 2105.50 | 6.2663 | | | | |

Etude d'une machine frigorifique négative

Ifri -akbou

Résumé

Pour répondre au problème posé par l'entreprise Ifri qui consiste à réaliser une étude comparative entre le R404A qui est celui adopté par l'entreprise et deux autres fluides qui sont le R134a et le R717 tout en gardant toujours un seul groupe frigorifique. L'essentiel de notre travail a porté sur la réalisation d'un bilan thermique, l'analyse thermodynamique et l'étude comparative.

Mots clés : Machine frigorifique, R404A, R134a, R717, chambre froide.

Abstract

To respond to the problem posed by the company Ifri which consists in carrying out a comparative study between R404A which is the one adopted by the company and two other fluids which are R134a and R717 while always keeping a single refrigeration unit. Most of our work focused on the realization of a heat balance, thermodynamic analysis and comparative study.

Key words : Refrigeration machine, R404A, R134a, R717, cold room.

المخلص

للرد على المشكلة التي تطرحها شركة (Ifri) والتي تتمثل في إجراء دراسة مقارنة بين (R404A) التي تتبناها الشركة، بسائلين آخرين هما (R134a) و (R717) مع الاحتفاظ دائماً بوحدة تبريد واحدة. ركز معظم عملنا على تحقيق التوازن الحراري، التحليل الديناميكي الحراري والدراسة المقارنة.

الكلمات الرئيسية: آلة التبريد، R404A، R134a، R717، الغرفة الباردة.